



**TUGAS AKHIR - MO 141326**

**ANALISIS *FATIGUE* PADA KONSTRUKSI CRANE PEDESTAL  
FLOATING STORAGE AND OFFLOADING (FSO) ARCO  
ARDJUNA PERTAMINA HULU ENERGI, ONWJ.**

**Moch. Hamzah**

**NRP. 4311 100 018**

**JURUSAN TEKNIK KELAUTAN**

**Fakultas Teknologi Kelautan**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya 2016**



**FINAL PROJECT - MO 141326**

**FATIGUE ANALYSIS OF BOW CRANE PEDESTAL CONSTRUCTION  
OF (FSO) FLOATING STORAGE AND OFFLOADING - ARCO  
ARDJUNA, PERTAMINA HULU ENERGI ONWJ.**

**Moch. Hamzah**

**NRP. 4311 100 018**

**JURUSAN TEKNIK KELAUTAN  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**

**ANALISIS FATIGUE PADA KONSTRUKSI CRANE PADESTAL FLOATING  
STORAGE AND OFFLOADING (FSO) ARCO ARDJUNA PERTAMINA  
HULU ENERGI, ONWJ**

**TUGAS AKHIR**

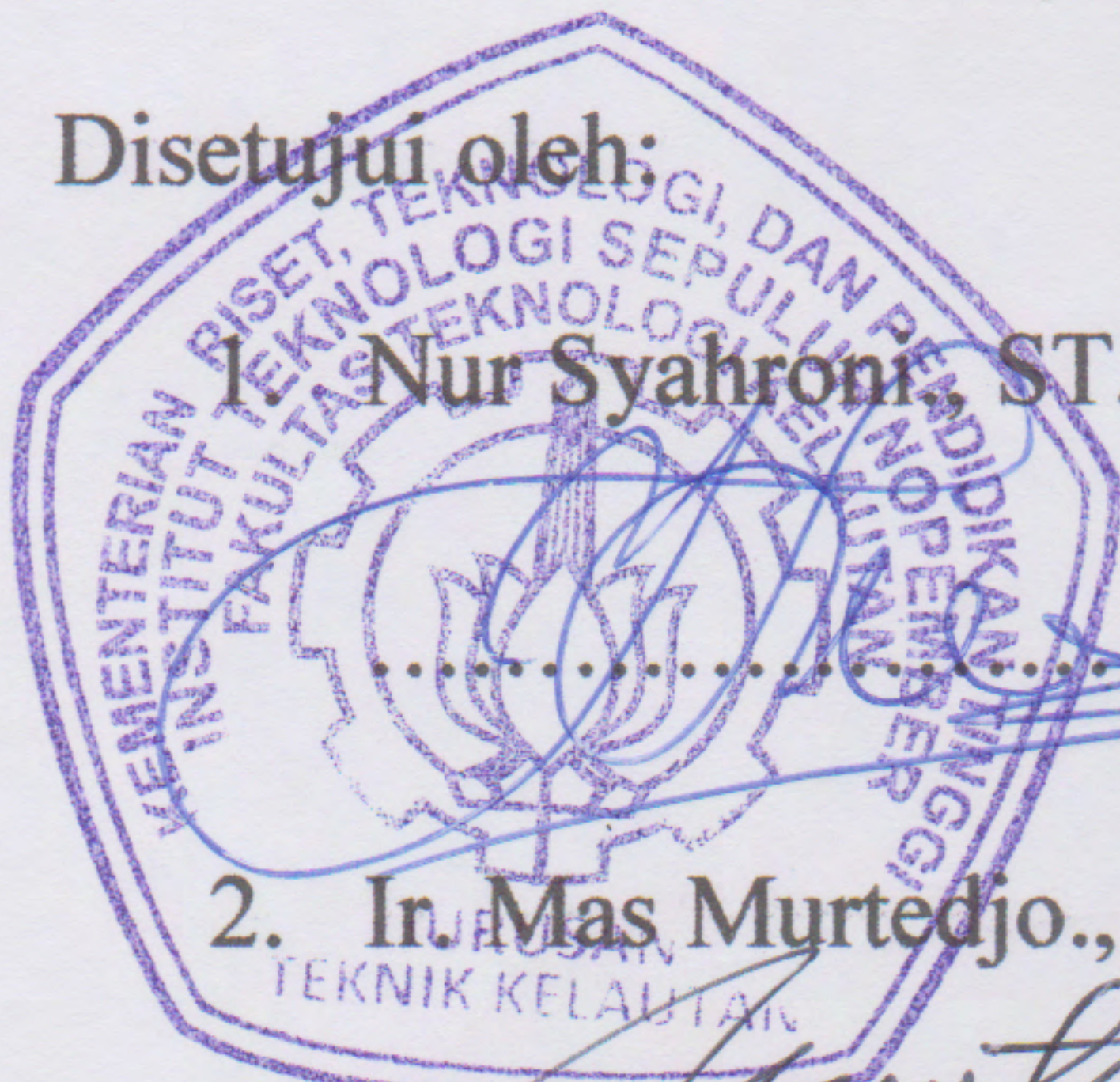
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh

Moch Hamzah

NRP. 4311 100 018

Disetujui oleh:



1. Nur Syahroni ST., MT.Ph.D

(Pembimbing 1)

2. Ir. Mas Murtedjo., M.Eng

(Pembimbing 2)

3. Ir. Joswan JS., M.Sc

(Penguji 1)

4. Ir. Handayanu., M.Sc.Ph.D

(Penguji 2)

5. Ir. Imam Rochani, M. Sc

(Penguji 3)

6. Yoyok Setyo H. ST., MT.Ph.D

(Penguji 4)

**ANALISIS *FATIGUE* PADA KONSTRUKSI *CRANE PEDESTAL*  
*FLOATING STORAGE AND OFFLOADING (FSO) ARCO ARDJUNA,*  
PERTAMINA HULU ENERGI, ONWJ.**

**Nama Mahasiswa : Moch. Hamzah**  
**NRP : 4311100018**  
**Jurusan : Teknik Kelautan – FTK ITS**  
**Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.**  
**Ir. Mas Murtedjo, M. Eng**

**ABSTRAK**

Dalam tugas akhir ini dilakukan analisis umur kelelahan konstruksi *bow crane pedestal* yang akan dipasang di atas konstruksi *midship section* nomer 18 FSO Arco Ardjuna PHE, ONWJ yang tertambat pada sebuah sistem tambatan *Single Point Mooring (SPM)*. Analisis ini dilakukan sebagai dasar acuan perancangan, inspeksi dan reassessment crane pedestal sebagai konstruksi penyangga struktur *crane* yang akan dipasang dan beroperasi di atasnya. Dengan mengetahui perilaku gerak FSO Arco Ardjuna yang tertambat pada *Single Point Mooring* akibat beban lingkungan perairan operasi FSO Arco Ardjuna, maka dapat dihitung berapa besar beban akibat gaya translasi dan momen gaya (torsi) yang terjadi pada *crane* akibat akselerasi struktur FSO dalam kondisi tertambat pada SPM. Selain itu, dianalisis pula berapa besar *shear stress* dan *total bending moment* pada setiap konstruksi *midship section* dengan perhitungan kekuatan memanjang akibat beban perairan dalam kondisi *still water*, *calm water*, dan akibat gelombang *sagging* maupun *hogging*. Di dalam analisis ini beban momen angin juga dihitung berdasarkan bentuk area penampang angin pada *crane pedestal*. Kombinasi dari keseluruhan beban – beban tersebut termasuk berat struktur sendiri adalah inputan dalam analisis tegangan untuk mendapatkan *Hot-Spot Stress* yang akan dijadikan dasar perhitungan umur kelelahan konstruksi *crane pedestal* menggunakan metode S-N Curve berdasarkan hukum kegagalan *Palmgren Miner* dengan mengestimasi kegagalan akibat kelelahan dengan *simplified method*. Dari hasil pemodelan numerik yang dilakukan, diketahui bahwa perilaku gerak terbesar pada FSO Arco Ardjuna dalam kondisi tertambat yaitu sebesar 1,2 °/m untuk gerakan *roll* saat kondisi muatan kosong. Untuk beban torsi crane terbesar terjadi akibat akselerasi gerakan *roll* sebesar 2051,7 kN.m serta *shear force* dan *bending moment* pada frame 16 terbesar terjadi akibat efek *hogging* masing – masing sebesar 48,74 ton dan 38,63 ton.m. Berdasarkan hasil analisis tegangan yang telah dilakukan nilai tegangan terbesar yang terjadi pada konstruksi *bow crane pedestal* adalah 129,88 Mpa dengan nilai deformasi sebesar 0,75 mm. Hasil tersebut masih diijinkan apabila mengacu pada tegangan ijin dan nilai deformasi yang dianjurkan ABS yaitu 225 MPa dan 11,2 mm. Berdasarkan tegangan maksimum tersebut, diperoleh hasil perhitungan umur kelelahan konstruksi *bow crane pedestal* sebesar 115,8 tahun.

**Kata Kunci :** *FSO, bow crane pedestal, maximum principal stress, hot-spot stress, simplified fatigue assessment*

**FATIGUE LIFE ANALYSIS OF CRANE PEDESTAL CONSTRUCTION  
OF FLOATING STORAGE AND OFFLOADING (FSO) ARCO ARDJUNA,  
PERTAMINA HULU ENERGI, ONWJ.**

**Name** : Moch. Hamzah  
**NRP** : 4311100018  
**Department** : Teknik Kelautan – FTK ITS  
**Supervisors** : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.  
Ir. Mas Murtedjo, M. Eng

**ABSTRACT**

*In this paper, the bow crane pedestal construction that will be installed on top of No.18 midship section of FSO Arco Ardjuna Pertamina Hulu Energi ONWJ that moored to single point mooring structure will be analyzed in fatigue life analysis to obtained its operation-service life. This analysis must be done, because it is important to predict how long the service life of a structure or construction design before the installation or as the references for inspection and reassessment. By doing global motion analysis of FSO while its moored to SPM, so the motion acceleration of FSO that cause the translation force and torque of crane structure can be obtained. Furthermore, because of the crane pedestal will be modelled with a few of midship section (No.16,17,18,19 and 20), So the shear stress and total bending moment of each section will be considered and analyzed using longitudinal strength analysis due to effect of still water, calm water and sagging-hogging waves. In this fatigue life analysis the moment caused by wind force will be considered too, by considering the crane pedestal elevation and its shape factor. All of these kind of loading which give effects to crane pedestal construction will be combined in stress analysis to obtain the Hot-Spot Stress that will use in fatigue life analysis using S-N Curve based on Palmgren Miner's Failure Law to estimate damage caused by fatigue with simplified method. Based on the numerical analysis that has been done, obtained the largest magnitude motion of FSO in moored condition is  $1,2^0/m$  for the roll motion. The largest magnitude of crane torque impact to crane pedestal construction due to FSO motion acceleration is 2051,7 kN.m caused by roll motion and the largest number of shear force and bending moment at No. 16 midship section are 48,74 tonne and 38,63 tonne.m. Due to all of the loading and its combination, the largest number of stress and deformation that ever occurred in stress analysis of this fatigue analysis is 129,88 MPa with 0,75 mm of deformation. That number of stress and deformation are still allowed by refer The American Bureau of Ship Rules of maximum allowable stress and deformation that recommend the number of stress and deformation must be below of 225MPa and 11,2 mm of deformation. Based on that maximum occurred stress, obtained the fatigue life of bow crane pedestal of FSO Arco Ardjuna is 115,8 years.*

**Keywords** : FSO, bow crane pedestal, maximum principal stress, hot-spot stress, simplified fatigue assessment

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah sehingga penulis dapat melewati segala kendala dan permasalahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul, “**Analisis *Fatigue* Pada Konstruksi *Crane Pedestal Floating Storage And Offloading (FSO) Arco Ardjuna Pertamina Hulu Energi, ONWJ*”**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini berisi tentang analisis gerakan pada struktur *Floating Storage And Offloading (FSO) Arco Ardjuna* yang tertambat pada struktur *Single Poin Mooring (SPM)*, kemudian didapatkan beban gaya translasi dan torsi *crane* serta analisis kekuatan memanjang struktur FSO dan perhitungan beban momen angin yang dijadikan sebagai parameter pembebanan pada pemodelan sub-global konstruksi *midship section* dan *bow crane pedestal* sehingga didapatkan hasil tegangan maksimum dan dilanjutkan dengan perhitungan umur kelelahan konstruksi untuk memprediksi berapa lama umur kelelahan konstruksi *crane pedestal*.

Penulis mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca demi perbaikan dan kesempurnaan penyusunan dan penulisan berikutnya. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang rekayasa kelautan, bagi pembaca pada umumnya dan bagi penulis sendiri pada khususnya..

Surabaya, Januari 2016

Penulis

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan kemudahan sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya,
2. Orang tua penulis yang senantiasa mendoakan dan memberi dukungan baik moril maupun materiil dari masa awal pendidikan hingga tahap sarjana,
3. Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing pertama dan Ir. Murtedjo, M. Eng. selaku dosen pembimbing kedua yang selalu dengan sabar membimbing, mengajari dan memberi nasehat penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini,
4. Bapak Ir. Imam Rochani M.Sc. selaku dosen wali yang selalu membimbing dan mengarahkan penulis dalam segala urusan perkuliahan dari awal hingga akhir perkuliahan.
5. Bapak-bapak dosen penguji yang telah memberikan masukan sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik,
6. Semua saudara – saudara The Trident L-29 P-51 yang selalu memberikan dukungan demi terselesaikannya Tugas Akhir ini,
7. Terimakasih kepada Ariesta Ayu Dian A. yang telah memberi semangat penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
8. Terimakasih kepada kawan – kawan Warkop Cak Di Kebonsari Kribo (Fajri), Pandu, Isol (Faisal), Imem (Zulwaqor), Ayik (Fakhri), Nopik (Noviandre), Adam, Mangkok (Bidin), Dio, Gondoh, Cak Di, Mas Dedi, Pak Paul, dll.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai tepat pada waktunya.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan .....	4
1.4. Manfaat .....	4
1.5. Batasan Masalah .....	5
1.6. Sistematika Penulisan .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....</b>	<b>7</b>
2.1. Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 . Dasar Teori.....	8
2.2.1. <i>Floating Storage and Offloading System (FSO)</i> .....	8
2.2.2. <i>Crane</i> .....	9
2.2.2.1 <i>Crane Padestal</i> .....	10
2.2.3. Teori Gerak Kapal.....	11
2.2.4. Gelombang Sinusoidal .....	13
2.2.5. <i>Heading (Arah) Kapal terhadap Arah Gelombang</i> .....	16
2.2.6. Gerakan <i>Heave</i> Murni .....	16
2.2.7. Gerakan <i>Sway</i> Murni.....	19
2.2.8. Gerakan <i>Surge</i> Murni.....	21



2.2.9. Gerakan <i>Pitch</i> Murni ( <i>Uncouple Pitching Motion</i> ) .....	23
2.2.10. Gerakan <i>Roll</i> Murni ( <i>Uncouple Rolling Motion</i> ).....	26
2.2.11. Gerakan <i>Yaw</i> Murni ( <i>Uncouple Rolling Motion</i> ).....	28
2.2.12. Gerakan <i>Couple Six Degree of Freedom</i> .....	30
2.2.13. Konsep Pembebanan .....	31
2.2.14. Beban Gelombang.....	32
2.2.15. Beban Arus.....	32
2.2.16 Beban Angin .....	32
2.2.17 Respon Amplitude Operator (RAO) .....	37
2.2.18. Spektrum Gelombang.....	37
2.2.19. Spektrum Respon .....	38
2.2.20. Kekuatan Memanjang .....	39
2.2.21. <i>Longtudinal Bending Moment Pada Still Water</i> .....	41
2.2.22. <i>Longtudinal Bending Moment Pada Calm Water</i> .....	41
2.2.23. <i>Longtudinal Bending Moment Pada Regular Water</i> .....	43
2.2.24. Beban Angkat Crane .....	44
2.2.25. Tegangan Yang Bekerja Pada Crane .....	45
2.2.26. Tegangan Aksial .....	47
2.2.27. Bending Stress .....	48
2.2.28. Tegangan Geser .....	49
2.2.29. Boundary Condition dan Meshing.....	49
2.2.30. Tegangan Maksimum Utama .....	50
2.2.31. Metode Perhitungan Umur Kelelahan.....	51
2.2.32. Kurva S-N .....	53
2.2.33. Penaksiran Umur Kelelahan Sederhana .....	54
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>55</b>
3.1. Metodologi Penelitian .....	55
3.2. Prosedur Penelitian.....	58
3.3. Pengumpulan Data .....	60
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>63</b>

4.1. Pemodelan .....	63
4.1.1 Pemodelan FSO .....	63
4.1.2 Pemodelan SPM.....	64
4.2. Hidrostatik.....	65
4.3 Analisis Gerakan FSO.....	66
4.4 Respon Amplitude Operator .....	68
4.5 Spektrum Gelombang.....	84
4.6 Respon Spektra FSO Arco Ardjuna saat kondisi tertambat.....	85
4.7 Single Amplitude Accelerations .....	93
4.8 Curve of Sectional Area .....	94
4.9 Penyebaran Barat FSO Arco Ardjuna .....	95
4.10 Penyebaran Gaya Apung FSO Arco Ardjuna .....	97
4.11 Analisis Penyebaran Global Moment FSO Arco Ardjuna pada Kondisi Diam di Still Water .....	98
4.12 Penyebaran Shear Force dan Bending Moment FSO Arco Ardjuna Akibat Pengaruh Muatan Kondisi Sagging-Hogging .....	100
4.13 Shear Force dan Bending Moment Sebaai Beban Pada Analisis Tegangan Konstruksi Midship Section.....	104
4.14 Perhitungan Gaya Gerak Translasi Crane Akibat Akselerasi Gerakan Translasi FSO.....	104
4.15 Perhitungan Momen Gaya Angular (Torsi) Crane Akibat Akselerasi Gerakan Rotasional FSO.....	106
4.16 Tegangan Aksial.....	109
4.17 Perhitungan Beban Angin .....	109
4.17.1 Perhitungan Kecepatan Angin .....	109
4.17.2 Perhitungan Gaya Angin .....	109
4.17.3 Momen Angin .....	109
4.17.4 Beban Angkat Crane .....	109
4.18 Parameter Pebebanan .....	109
4.19 Permodelan Konstruksi Lambung Kapal .....	112

4.20 Permodelan Konstruksi Bow Crane Pedestal.....	114
4.21 Permodelan Konstruksi Frame 16,17,18,19,20 dan Bow Crane Pedestal...	117
4.22 Analisis Meshing Sensitivity Bow Crane Pedestal .....	118
4.23 Batasan Analisis dan Pembebanan Bow Crane Pedestal .....	120
4.24 Analisis Tegangan Bow Crane Pedestal .....	124
4.25 Analisis Umur Kelelahan Bow Crane Pedestal.....	126
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>131</b>
5.1. Kesimpulan .....	131
5.2. Saran.....	132
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>135</b>
<b>LAMPIRAN A</b>	
<b>LAMPIRAN B</b>	
<b>LAMPIRAN C</b>	
<b>LAMPIRAN D</b>	
<b>LAMPIRAN E</b>	
<b>BIODATA PENULIS</b>	

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1.</b> (Floating and Storage and Offloading System)FSO Arco Ardjuna .....	1
<b>Gambar 1.2</b> Konstruksi Bow Crane pada FSO Arco Ardjuna .....	2
<b>Gambar 1.3</b> Lokasi Bow Crane pada FSO Arco Ardjuna .....	3
<b>Gambar 2.1</b> <i>Crane</i> .....	10
<b>Gambar 2.2</b> Posisi Horizontal dari <i>Boom Tip Crane</i> .....	10
<b>Gambar 2.3</b> <i>Six degree of freedom</i> pada Bangunan Apung.....	12
<b>Gambar 2.4</b> Gelombang sinusoidal .....	14
<b>Gambar 2.5</b> Vektor dari <i>simple harmonic motion</i> .....	14
<b>Gambar 2.6</b> Definisi arah datang gelombang terhadap <i>heading</i> kapal.....	16
<b>Gambar 2.7</b> Ilustrasi gerakan <i>heaving</i> pada bangunan apung .....	17
<b>Gambar 2.8</b> Ilustrasi Gerakan <i>Swaying</i> pada bangunan apung .....	19
<b>Gambar 2.9</b> Ilustrasi gerakan <i>pitching</i> pada bangunan apung.....	23
<b>Gambar 2.10</b> Ilustrasi gerakan <i>rolling</i> pada bangunan apung.....	26
<b>Gambar 2.11</b> <i>Sagging</i> dan <i>hogging</i> .....	39
<b>Gambar 2.12</b> Pengaruh berat bangunan apung dan bouyancy terhadap kekuatan Memanjang .....	40
<b>Gambar 2.13</b> Gaya vertikal ( <i>weight</i> dan <i>bouyancy</i> ) yang mempengaruhi kekuatan memanjang kapal .....	40
<b>Gambar 2.14</b> <i>Shearing force</i> dan <i>bending moment</i> .....	41
<b>Gambar 2.15</b> <i>Still Water</i> dan <i>wave bending moment</i> .....	42
<b>Gambar 2.16</b> <i>Free Body diagram crane</i> .....	45
<b>Gambar 2.17</b> Tegangan tiga dimensi pada suatu elemen .....	46
<b>Gambar 2.18</b> Gaya geser pada balok.....	47
<b>Gambar 2.19</b> Ilustrasi tegangan normal akibat gaya aksial, (+)tarik dan (-) tekan .....	48
<b>Gambar 2.20</b> Tegangan lentur ( <i>bending</i> ) pada suatu penampang .....	48
<b>Gambar 2.21</b> Gaya yang bekerja dalam arah sejajar terhadap penampang .....	49
<b>Gambar 2.22</b> Pembuatan <i>mesh</i> pada konstruksi kapal.....	50

<b>Gambar 2.23</b> Tegangan Maksimum Utama.....	51
<b>Gambar 2.24</b> Kurva S-N.....	53
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Metodologi Penelitian .....	55
<b>Gambar 4.1</b> Pemodelan FSO Arco Ardjuna Menggunakan Maxsurf V8i 20 Advanced Modeller .....	63
<b>Gambar 4.2</b> Pemodelan SPM - SBM Arco Ardjuna Menggunakan Maxsurf V8i 20 Advanced Modeller .....	64
<b>Gambar 4.3</b> Pemodelan FSO Arco Ardjuna dalam kondisi free floating menggunakan software ANSYS Workbench 16.0-AQWA .....	67
<b>Gambar 4.4</b> Pemodelan FSO Arco Ardjuna dalam kondisi free floating menggunakan software ANSYS Workbench 16.0-AQWA.....	67
<b>Gambar 4.5</b> Grafik RAO Translasi FSO <i>Free Floating</i> 0 derajat kondisi <i>light load</i> ...	68
<b>Gambar 4.6</b> Grafik RAO Rotasi FSO <i>Free Floating</i> 0 derajat kondisi <i>light load</i> .....	69
<b>Gambar 4.7</b> Grafik RAO Translasi FSO <i>Free Floating</i> 90 derajat kondisi <i>light load</i> .	70
<b>Gambar 4.8</b> Grafik RAO Rotasi FSO <i>Free Floating</i> 90 derajat kondisi <i>light load</i> .....	70
<b>Gambar 4.9</b> Grafik RAO Translasi FSO <i>Free Floating</i> 180 derajat kondisi <i>light load</i> .....	71
<b>Gambar 4.10</b> Grafik RAO Rotasi FSO <i>Free Floating</i> 180 derajat kondisi <i>light load</i> .....	72
<b>Gambar 4.11</b> Grafik RAO Translasi FSO <i>Free Floating</i> 0 derajat kondisi <i>full load</i> ...	72
<b>Gambar 4.12</b> Grafik RAO Rotasi FSO <i>Free Floating</i> 0 derajat kondisi <i>full load</i> .....	73
<b>Gambar 4.13</b> Grafik RAO Translasi FSO <i>Free Floating</i> 90 derajat kondisi <i>full load</i> .....	74
<b>Gambar 4.14</b> Grafik RAO Rotasi FSO <i>Free Floating</i> 90 derajat kondisi <i>full load</i> .....	74
<b>Gambar 4.15</b> Grafik RAO Translasi FSO <i>Free Floating</i> 180 derajat kondisi <i>full load</i> .....	75
<b>Gambar 4.16</b> Grafik RAO Rotasi FSO <i>Free Floating</i> 180 derajat kondisi <i>full load</i> ....	76
<b>Gambar 4.17</b> Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 0 derajat kondisi <i>light load</i> .....	76
<b>Gambar 4.18</b> Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 0 derajat kondisi <i>light load</i> .....	77
<b>Gambar 4.19</b> Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 90 derajat kondisi <i>light load</i> .....	78
<b>Gambar 4.20</b> Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 90 derajat kondisi <i>light load</i> .....	78
<b>Gambar 4.21</b> Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 180 derajat kondisi <i>light load</i> ...	79

<b>Gambar 4.22</b>	Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 180 derajat kondisi <i>light load</i> .....	80
<b>Gambar 4.23</b>	Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 0 derajat kondisi <i>full load</i> .....	80
<b>Gambar 4.24</b>	Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 0 derajat kondisi <i>full load</i> .....	81
<b>Gambar 4.25</b>	Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 90 derajat kondisi <i>full load</i> .....	82
<b>Gambar 4.26</b>	Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 90 derajat kondisi <i>full load</i> .....	82
<b>Gambar 4.27</b>	Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 180 derajat kondisi <i>full load</i> .....	83
<b>Gambar 4.28</b>	Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 180 derajat kondisi <i>full load</i> .....	84
<b>Gambar 4.29</b>	Spektrum Gelombang JONSWAP Perairan Laut Jawa dengan $H_s=1,8$ m .....	85
<b>Gambar 4.30</b>	Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>light load</i> dan <i>heading</i> 0 derajat .....	85
<b>Gambar 4.31</b>	Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>light load</i> dan <i>heading</i> 0 derajat .....	86
<b>Gambar 4.32</b>	Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>light load</i> dan <i>heading</i> 90 derajat .....	87
<b>Gambar 4.33</b>	Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>light load</i> dan <i>heading</i> 90 derajat .....	87
<b>Gambar 4.34</b>	Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>light load</i> dan <i>heading</i> 180 derajat .....	88
<b>Gambar 4.35</b>	Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>light load</i> dan <i>heading</i> 180 derajat .....	89
<b>Gambar 4.36</b>	Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>full load</i> dan <i>heading</i> 0 derajat .....	89
<b>Gambar 4.37</b>	Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>full load</i> dan <i>heading</i> 0 derajat .....	90
<b>Gambar 4.38</b>	Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>full load</i> dan <i>heading</i> 90 derajat .....	91
<b>Gambar 4.39</b>	Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>full load</i> dan <i>heading</i> 90 derajat .....	91
<b>Gambar 4.40</b>	Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>full load</i> dan <i>heading</i> 180 derajat .....	92
<b>Gambar 4.41</b>	Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan <i>full load</i> dan <i>heading</i> 180 derajat .....	93
<b>Gambar 4.42</b>	<i>Curve of Sectional Area FSO Arco Ardjuna</i> .....	95
<b>Gambar 4.43</b>	Grafik penyebaran berat FSO Arco Ardjuna Muatan kosong .....	96

<b>Gambar 4.44</b>	Grafik penyebaran berat FSO Arco Ardjuna Muatan penuh .....	97
<b>Gambar 4.45</b>	Grafik penyebaran gaya apung FSO Arco Ardjuna.....	97
<b>Gambar 4.46</b>	Grafik penyebaran <i>shear force</i> dan <i>bending moment still water</i> pada variasi muatan tangki 0%.....	98
<b>Gambar 4.47</b>	Grafik penyebaran <i>shear force</i> dan <i>bending moment still water</i> pada variasi muatan tangki 30%.....	99
<b>Gambar 4.48</b>	Grafik penyebaran <i>shear force</i> dan <i>bending moment still water</i> pada variasi muatan tangki 95%.....	99
<b>Gambar 4.49</b>	Grafik penyebaran <i>shear force</i> dan <i>bending moment</i> akibat <i>Sagging</i> Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 0% .....	101
<b>Gambar 4.50</b>	Grafik penyebaran <i>shear force</i> dan <i>bending moment</i> akibat <i>Sagging</i> Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 30% .....	101
<b>Gambar 4.51</b>	Grafik penyebaran <i>shear force</i> dan <i>bending moment</i> akibat <i>Sagging</i> Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 95% .....	102
<b>Gambar 4.52</b>	Grafik penyebaran <i>shear force</i> dan <i>bending moment</i> akibat <i>Hogging</i> Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 0% .....	102
<b>Gambar 4.53</b>	Grafik penyebaran <i>shear force</i> dan <i>bending moment</i> akibat <i>Hogging</i> Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 30% .....	103
<b>Gambar 4.54</b>	Grafik penyebaran <i>shear force</i> dan <i>bending moment</i> akibat <i>Hogging</i> Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 95% .....	103
<b>Gambar 4.55</b>	Ilustrasi posisi <i>crane</i> terhadap COG FSO .....	106
<b>Gambar 4.56</b>	Pemodelan 3D konstruksi frame 16.....	113
<b>Gambar 4.57</b>	Pemodelan 3D konstruksi frame 17,18 dan19.....	113
<b>Gambar 4.58</b>	Pemodelan 3D konstruksi frame 20 (bulkhead construction).....	114
<b>Gambar 4.59</b>	Konstruksi <i>Bow Crane Pedestal</i> FSO Arco Ardjuna .....	115
<b>Gambar 4.60</b>	Foto <i>existing</i> konstruksi <i>bow crane pedestal</i> pada FSO Arco Ardjuna..	116
<b>Gambar 4.61</b>	Pemodelan 3D konstruksi <i>bow crane pedestal</i> yang terletak di frame 18.....	116
<b>Gambar 4.62</b>	Pemodelan 3D konstruksi <i>bow crane pedestal</i> yang terletak di frame 18.....	117
<b>Gambar 4.63</b>	<i>Meshing</i> struktur .....	118
<b>Gambar 4.64</b>	Grafik Sensitivitas <i>meshing</i> model konstruksi lambung FSO Arco Ardjuna dan <i>bow crane pedestal</i> .....	119
<b>Gambar 4.65</b>	Tumpuan <i>fix</i> pada konstruksi frame 20 .....	121
<b>Gambar 4.66</b>	Pembebanan <i>Shear Force</i> pada frame 16 .....	122

<b>Gambar 4.67</b> Pembebanan <i>Bending Moment</i> pada frame 16.....	122
<b>Gambar 4.68</b> Pembebanan pada <i>Crane Pedestal face</i> akibat gerakan translasi FSO.....	123
<b>Gambar 4.69</b> Pembebanan pada <i>Crane Pedestal face</i> akibat gerakan rotasional FSO .....	123
<b>Gambar 4.70</b> Stress yang terjadi pada konstruksi <i>Crane Pedestal</i> .....	124
<b>Gambar 4.71</b> Deformasi yang terjadi pada konstruksi <i>Crane Pedestal</i> .....	125
<b>Gambar 4.72</b> Penomoran titik-titik kritis pada struktur Konstruksi Crane Pedestal.....	126
<b>Gambar 4.73</b> Konstruksi Kritis.....	127



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1.</b> Principle dimension dan data hidrostatis FSO Arco Ardjuna .....	60
<b>Tabel 3.2.</b> Main dimension CALM bouy .....	61
<b>Tabel 3.3</b> Karakteristik <i>Anchor Legs</i> .....	61
<b>Tabel 4.1</b> Data hidrostatis hasil luaran software Maxsurf untuk model FSO Arco Ardjuna dalam kondisi <i>light load</i> .....	65
<b>Tabel 4.2</b> Data hidrostatis hasil luaran software Maxsurf untuk model FSO Arco Ardjuna dalam kondisi <i>full load</i> .....	65
<b>Tabel 4.3</b> Koreksi Hidrostatis Antara data hasil luaran Maxsurf dengan data yang sudah ada data kondisi <i>light load</i> dan <i>full load</i> .....	66
<b>Tabel 4.4</b> Output Maksimum <i>single amplitude accelerations</i> .....	94
<b>Tabel 4.5</b> <i>Shear Force</i> dan <i>Bending Moment</i> pada Frame 16,17,18,19,dan 20 FSO Arco Ardjuna Pada Regular Waves .....	104
<b>Tabel 4.6</b> Hasil serta perhitungan gaya gerak translasi pada Crane dengan variasi muatan <i>light load</i> .....	105
<b>Tabel 4.7</b> Hasil serta perhitungan gaya gerak translasi pada Crane dengan variasi muatan <i>full load</i> .....	105
<b>Tabel 4.8</b> Hasil serta perhitungan momen gaya angular ( <i>torsi</i> ) pada Crane dengan variasi muatan <i>light load</i> .....	108
<b>Tabel 4.9</b> Hasil serta perhitungan momen gaya angular ( <i>torsi</i> ) pada Crane dengan variasi muatan <i>full load</i> .....	108
<b>Tabel 4.10</b> <i>Shapes Coefficients C for Sphere-Shaped Structure</i> .....	110
<b>Tabel 4.11</b> Tabel parameter pembebanan kondisi light load.....	112
<b>Tabel 4.12</b> Tabel parameter pembebanan kondisi full load .....	112
<b>Tabel 4.13</b> Dimensi Bow Crane Padestal FSO Arco Ardjuna.....	114
<b>Tabel 4.14</b> Material Properties Bow Crane Padestal FSO Arco Ardjuna .....	116

<b>Tabel 4.15</b> Tabulasi hasil Maximum Principal Stress untuk variasi kerapatan <i>Meshing</i> .....	119
<b>Tabel 4.16</b> Perhitungan <i>Hot-Spot Stress</i> .....	127
<b>Tabel 4.17</b> Perhitungan <i>Hot-Spot Stress Range</i> .....	128
<b>Tabel 4.18</b> Perhitungan umur kelelahan konstruksi <i>crane padestal</i> dalam kondisi <i>light load</i> .....	129
<b>Tabel 4.19</b> Perhitungan umur kelelahan konstruksi <i>crane padestal</i> dalam kondisi <i>full load</i> .....	129

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

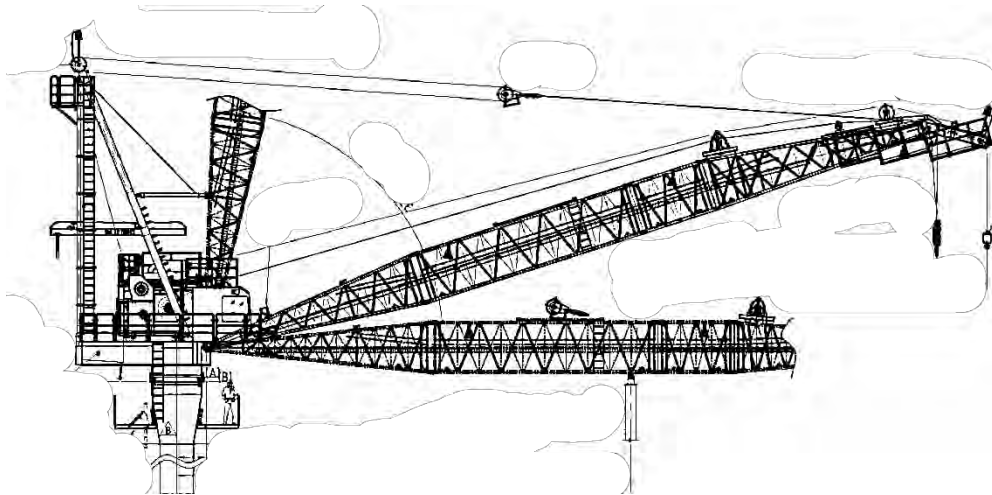
Kerusakan pada bangunan laut mayoritas diakibatkan oleh kelelahan (*fatigue*) pada struktur, baik itu pada komponen struktur utama maupun struktur sekunder. Kelelahan sangat dipengaruhi oleh beban siklis yang diterima oleh struktur, seperti beban gelombang dan beban angin. Kedua beban dinamis tersebut merupakan beban siklis yang dominan selama sebuah struktur beroperasi.

(*Floating Storage and Offloading System*) FSO merupakan salah satu struktur terapung menyerupai kapal yang berfungsi untuk menyimpan dan menyalurkan minyak dan gas bumi ke *Shuttle Tanker*. Sebagai salah satu jenis bangunan lepas pantai yang tergolong memiliki ukuran yang relatif besar, mendapatkan pengaruh yang sangat signifikan dari beban gelombang dan angin. Bangunan lepas pantai cenderung mengalami kelelahan karena beban lingkungan yang bekerja didominasi oleh gelombang yang bersifat siklis. Disamping itu, faktor – faktor operasi lain pada tingkatan tertentu juga dapat menambah beban siklis ini, sehingga keadaan struktur menjadi bertambah kritis. Gambar 1.1 adalah foto eksisting *Floating Storage and Offloading (FSO)* milik PHE ONWJ yang beroperasi di *Ardjuna Field*.



**Gambar 1.1** (*Floating Storage and Offloading System*) FSO Arco Ardjuna  
(Sumber: <http://ekanuri.com>)

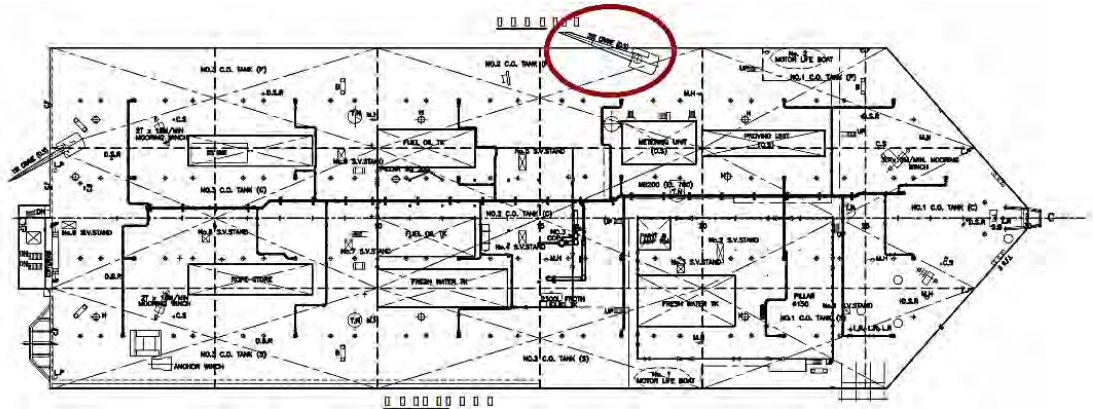
*Crane* merupakan salah satu struktur yang ada pada FSO jika memang diperlukan di dalam operasi FSO tersebut. Diantara fasilitas operasional yang bekerja pada FSO lainnya, *Crane* memiliki kemungkinan besar untuk mengalami kelelahan dikarenakan beban yang mengenai *crane* relatif signifikan. Umumnya, beban yang mengenai *crane* meliputi dua jenis beban yaitu beban statis dan beban dinamis. Beban statis pada *crane* merupakan berat dari crane itu sendiri. Sedangkan beban dinamis yang yaitu beban operasional, serta siklis berupa gerakan FSO yang disebabkan oleh gelombang dan beban angin. Struktur crane yang rentan terhadap kelelahan adalah pada crane pedestal dikarenakan crane pedestal merupakan tumpuan struktur di atasnya, serta tersambung dengan *hull structure* FSO. Gambar 1.2 merupakan Konstruksi *Bow Crane* pada FSO Arco Ardjuna.



**Gambar 1.2** Konstruksi *Bow Crane* pada FSO Arco Ardjuna

(Sumber: PT. Citra Mas, 2015)

Berdasarkan latar belakang di atas, maka pada tugas akhir ini dibahas mengenai analisis kelelahan (*fatigue*) pada *bow crane pedestal* (lokasi *bow crane pedestal* pada gambar 1.3) pada *Floating Storage and Offloading* (FSO) yang tertambat pada sebuah struktur SPM (*Single Point Mooring*) milik Pertamina Hulu Energi (ONWJ) bernama Ardjuna yang beroperasi di blok Ardjuna Jawa Barat. Gambar 1.3 Merupakan lokasi *Bow Crane* pada FSO Arco Ardjuna.



**Gambar 1.3** Lokasi *Bow Crane* pada FSO Arco Ardjuna

(Sumber: PT. Citra Mas, 2015)

Dalam kasus ini, instalasi *crane* memerlukan adanya analisis umur kelelahan pada *crane pedestal* untuk melihat apakah konstruksi *crane pedestal* dapat menumpu beban *crane* sepanjang umur operasi yang ingin dicapai. Dengan memodelkan FSO Arco Ardjuna dan SPM dalam kondisi tertambat, maka respon olah gerak struktur dapat dianalisis dan dijadikan acuan beban dalam menganalisis tegangan lokal pada *crane pedestal* disamping beban operasi, angin dan kekuatan memanjang struktur yang juga dijadikan acuan dalam analisis tegangan lokal konstruksi *crane pedestal*. Analisis tegangan lokal dengan beberapa kombinasi pembebanan bertujuan untuk menghitung *stress range histories* sebagai dasar analisis umur kelelahan konstruksi *bow crane pedestal* pada FSO Arco Ardjuna dengan menggunakan kurva S-N sesuai dengan hukum Palmgren-Miner dengan mengestimasi kerusakan kumulatif (*cumulative damage*) berdasarkan metode *simplified fatigue assessment*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Beban apa saja yang mempengaruhi FSO dan struktur *crane* sehingga mengakibatkan kelelahan (*fatigue*) pada *crane pedestal*?

2. Dimanakah letak dari *hotspot stress* serta *stress range histories* yang diterima struktur *crane pedestal*?
3. Berapa *fatigue life* dari *crane pedestal*?

### 1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Menghitung beban – beban yang menyebabkan kelelahan (*fatigue*) pada *crane pedestal*.
2. Menghitung letak *hotspot stress* serta *stress range histories* pada *crane pedestal* FSO Arco Ardjuna dengan beberapa kombinasi pembebanan.
3. Menghitung *fatigue life* dari konstruksi *crane pedestal*.

### 1.4 Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi terhadap beban – beban yang mempengaruhi umur kelelahan (*fatigue life*) dari *crane pedestal* pada FSO.
2. Dapat mengetahui besarnya pengaruh beban siklis dan beban operasional crane terhadap umur kelelahan (*fatigue life*) dari crane pedestal.
3. Prosedur dan hasil perhitungan dapat dijadikan dasar dan acuan dalam merancang konstruksi *crane pedestal* dengan mempertimbangkan beban – beban yang berpengaruh selama operasi struktur *crane* yang meletak di atas konstruksi *crane pedestal*.
4. Hasil perhitungan dapat dijadikan dasar pada saat inspeksi atau reassessment kekuatan struktur *crane pedestal*.

## 1.5 Batasan Masalah

Agar lebih memudahkan analisis dan dapat dicapai tujuan yang diharapkan, maka perlu diberikan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Crane pedestal yang ditinjau dalam tugas akhir ini adalah *crane pedestal* bagian depan pada FSO Arco Ardjuna, dengan dimensi FSO: LPP 142,6 m, breadth 48,2 m, depth 26,5 m, draft 24,0 m.
2. Beban yang ditinjau adalah beban akibat gelombang dan beban operasi *crane*.
3. Dalam analisis, perhitungan beban gelombang serta *motion* FSO akibat beban gelombang masuk ke dalam perhitungan beban angin dan beban operasi *crane*. Sehingga pengaruh beban gelombang dan *motion* FSO terhadap *fatigue life* struktur tidak dihitung secara langsung.
4. Nilai defleksi dari *crane boom* dan *pedestal* diabaikan.
5. Gerakan yang terjadi dari crane dan boom pada saat operasi diabaikan dan hanya ditinjau beban yang diangkat oleh crane saja.
6. Karena keterbatasan teknologi IT dalam pengoperasian software dan keterbatasan waktu, maka komponen struktur yang dimodelkan dan diperhitungkan dalam software hanya meliputi struktur *crane pedestal* tersebut dan setengah dari *hull structure* FSO yang mendukung di bawah.
7. Jenis atau cara pengelasan pada sambungan *pedestal* dan *hull* diasumsikan tersambung dengan baik dan tanpa cacat.
8. Analisis *fatigue* dilakukan pada bagian sambungan *crane pedestal* dengan *hull* FSO dengan metode hukum *Palmgren-Miner*.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Dalam bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan tugas

akhir ini, manfaat yang diperoleh, batasan masalah untuk membatasi analisis yang dilakukan, dan sistematika penulisan.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Bab ini berisi tinjauan pustaka dan dasar teori, yaitu hal-hal yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir ini. Persamaan-persamaan dan *codes* yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini diuraikan dalam bab ini.

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab metodologi penelitian menjelaskan langkah-langkah pengerjaan untuk menyelesaikan tugas akhir ini dan metode-metode yang digunakan.

## **BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini membahas permodelan FSO dan SPM dengan menggunakan *software Maxsurf V8i 20 – Advanced Modeller*. Perhitungan RAO FSO dalam kondisi free floating dan tertambat dilakukan dengan menggunakan *software ANSYS Workbench 16.0 – Hydrodynamic diffraction & Hydrodynamic Response*. *Software Maxsurf V8i 20* juga digunakan dalam perhitungan kekuatan memanjang kapal dengan *tools Advanced Stability (longitudinal strength analysis)*. Pembuatan model konstruksi *hull structure* dan *crane pedestal* dibantu dengan penggunaan *software Autodesk Autocad 2015*. Analisis struktur dengan pendekatan statis guna mendapatkan beberapa output tegangan dalam kombinasi beberapa input beban operasi dibantu dengan penggunaan *software ANSYS Workbench 16.0 – Static Structural*. Serta terakhir, adalah perhitungan manual umur kelelahan konstruksi crane pedestal menggunakan hukum palmgren-miner.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam merancang bangunan lepas pantai pertimbangan penting yang digunakan adalah perilaku hidrodinamis, kemampuan mobilitas, serta *reliability* dalam pengoperasian. Anjungan terapung merupakan anjungan yang mempunyai karakter bergerak mengikuti gerakan gelombang. Seringkali anjungan tipe ini dihubungkan dengan dasar laut menggunakan peralatan mekanik seperti kabel atau rantai. Untuk anjungan tipe ini, yang utama adalah mobilitas dan kemampuan mengantisipasi gerakan akibat gelombang dan arus laut (Djatkiko, 2012).

Bangunan lepas pantai sering mengalami beban yang sifatnya berulang (siklis) yang bisa menyebabkan kegagalan struktur akibat kelelahan. Seperti penelitian dari (Ayyub dan Gilberto, 2000), yang menggunakan *Motor Storage Tanker* (MST) Schichallion sebagai objek, dimana pada bagian haluan (*bow*) MST rentan terhadap kerusakan yang diakibatkan oleh gelombang maksimum. Struktur MST yang sangat rentan terhadap beban siklis memberikan pengaruh terhadap keberadaan struktur lainnya yang ada di dalam MST, seperti *crane, flare boom, separator*, dan lain-lain.

Sehingga perlu adanya analisis lebih detail terkait permasalahan beban siklis dan gelombang maksimum pada bangunan lepas pantai. Hal ini perlu untuk mengantisipasi adanya kerusakan yang ditimbulkan akibat beban siklis dan beban gelombang maksimum serta mitigasi untuk mengevakuasi personel agar tidak jatuh korban jiwa.

Ada beberapa tujuan pokok dalam analisa pengaruh beban maksimum yang mengenai struktur FSO ini, yaitu menentukan besar kekuatan memanjang kapal dan menghitung tegangan maksimum yang mengenai struktur lain pada FSO, dalam kasus ini adalah *crane pedestal*. Kemudian dari beberapa

analisis tersebut, didapatkan hasil yang nantinya dapat digunakan sebagai dasar dalam melakukan inspeksi atau *reassessment* kekuatan struktur *crane pedestal* dan menentukan beban siklis dan beban operasional *crane* terhadap kekuatan konstruksi dari *crane pedestal*.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 (*Floating Storage and Offloading System*) FSO

FSO (*Floating Storage and Offloading System*) merupakan salah satu jenis dari *Storage Tanker*. Berdasarkan fungsinya, FSO diartikan sebagai struktur terapung yang berfungsi sebagai penyimpanan dan penyalur minyak dan gas bumi tanpa dilengkapi dengan fasilitas pemrosesan. Didalam *OCIMF, Chapter Tandem Mooring Offloading Guidelines for CTs at F(P)SO Facilities*, FSO dan FPSO memiliki fungsi yang sama, akan tetapi minyak bumi atau gas tidak diproses di kapal. Jadi, FSO dapat didefinisikan sebagai suatu sistem terapung yang beroperasi untuk :

- Menerima hasil proses *crude oil* atau gas dari fasilitas pemrosesan eksternal,
- Menyimpan *crude oil* yang telah diproses,
- Menyalurkan *crude oil* atau gas ke *shuttle tanker*.

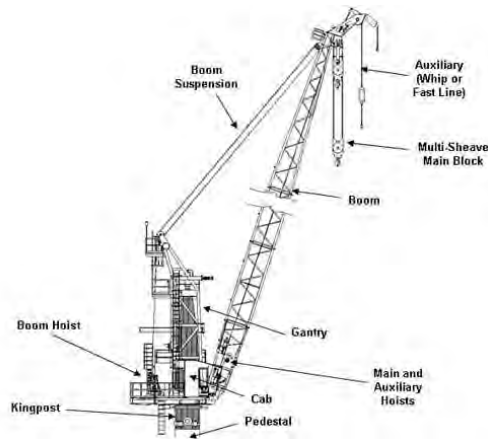
Saat ini kebutuhan akan FSO untuk melayani kebutuhan di wilayah *Offshore* semakin meningkat, maka dari itu, pengadaannya sudah mulai dilakukan baik dengan membangun kapal baru (*new-build*) atau melakukan konversi terhadap kapal-kapal bekas. Kelebihan dan kekurangan baik menggunakan bangunan baru ataupun konversi kapal bekas diantaranya biaya dan waktu produksi, desain dan konstruksi kapal, serta penentuan umur lelah kapal. Pembuatan FSO dengan membuat bangunan kapal baru (*new-build*) akan menguntungkan jika digunakan dalam jangka waktu operasional lebih dari 15 tahun. Namun, jika FSO didesain untuk jangka waktu operasional kurang dari 15 tahun, maka pengadaan FSO sebaiknya dilakukan dengan mengonversi kapal bekas, seperti kapal tanker yang memiliki bentuk lambung yang sama dengan kapal-kapal yang digunakan sebagai FSO.

Terdapat beberapa perbedaan apabila menggunakan Motor Tanker sebagai FSO. Pada umumnya Motor Tanker melakukan bongkar muat pada kondisi air tenang di pelabuhan, sedangkan FSO selalu melakukan bongkar muat di lepas pantai yang kondisinya selalu terkena beban lingkungan yang signifikan, yaitu beban angin dan gelombang. Untuk selanjutnya beban gelombang tersebut akan menjadi beban yang mendominasi pada FSO dan menjadi beban siklis karena sifatnya berulang. Karena sifat FSO yang diam di tempat dan tidak berlayar, maka jumlah beban siklis yang diterima oleh FSO lebih besar daripada jumlah beban siklis yang diterima oleh Motor Tanker.

### 2.2.2 *Crane*

*Crane* adalah jenis mesin yang umumnya dilengkapi dengan *hoist*, *wire rope* atau rantai, yang dapat digunakan untuk mengangkat dan memindahkan material secara horizontal. Hal ini terutama digunakan untuk mengangkat hal-hal yang berat dan mengangkut material/ benda ke tempat lain. *Cranes* biasanya digunakan dalam industri transportasi untuk bongkar muat barang, dalam industri konstruksi untuk pergerakan material dan di industri manufaktur untuk perakitan alat berat. Pada FSO, *crane* dibutuhkan untuk membantu kinerja FSO.

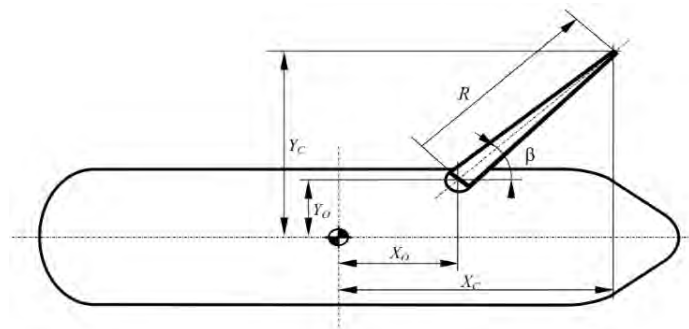
Dalam pembuatan dan pengembangan kapasitas *crane*, ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan, seperti faktor struktur pada *crane* dan faktor operasional yang mempengaruhi kapasitas total dari *crane* tersebut. Operasi pengangkatan pada *crane* pada FSO lebih berbahaya dibandingkan operasi yang sama pada *fixed offshore structure*. Disaat kondisi lingkungan yang berbahaya, *crane* pada FSO mendapatkan tambahan beban dinamis yaitu beban ayunan (*swing*). Gambar 2.1 di bawah merupakan salah satu contoh Gambar *crane*.



**Gambar 2.1 Crane**

(Sumber : <http://www.seatrax.com/Cranebasics.html>)

Selain itu, *boom tip crane* pada FSO akan mengalami gerakan akibat pengaruh dari gelombang, baik ke arah vertikal maupun horizontal. Besarnya gerakan (*motion*) sangat bergantung dari *seastate*, arah datang gelombang dan posisi dari *boom tip* yang juga bergantung pada posisi *crane* terhadap *centre of gravity* (COG) dan jari-jari ( $R$ ) serta sudut ( $\beta$ ) dari *boom crane*, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah yang merupakan ilustrasi posisi horizontal dari *Boom Tip Crane* :



**Gambar 2.2** Posisi horizontal dari *Boom Tip Crane*

(Sumber: Langen dan Than, 1996)

### 2.2.2.1 Crane pedestal

*Crane pedestal* adalah sebuah sub-struktur (konstruksi) pendukung yang di atasnya terdapat bagian struktur *crane* yang dapat berputar dan menjulang tinggi, dan berfungsi sebagai dasar konstruksi untuk menyangga

struktur yang ada di atasnya. *Crane pedestal* merupakan salah satu struktur yang ada pada FSO yang harus diperhitungkan kekuatan konstruksinya terhadap pengaruh beban. Beban yang mengenai *crane* cukup signifikan, yang secara umum dapat diklarifikasikan menjadi dua jenis, yaitu beban statis dan beban dinamis. Beban statis adalah berat dari *crane* itu sendiri, sedangkan beban dinamis yaitu beban operasional dan beban lingkungan. Di sini FSO Arco Ardjuna memiliki dua buah *crane* yang terletak di bagian haluan (*bow*) dan samping kapal. *Crane Pedestal* yang terdapat pada kapal merupakan *Crane Pedestal* tipe C (API RP 2C, 2004) yang dibagi menjadi dua bagian, yaitu *crane coloumn* yang berada diatas *main deck* dan *crane reinforcement* yang menjadi satu dengan konstruksi kapal.

### 2.2.3 Teori Gerak Kapal

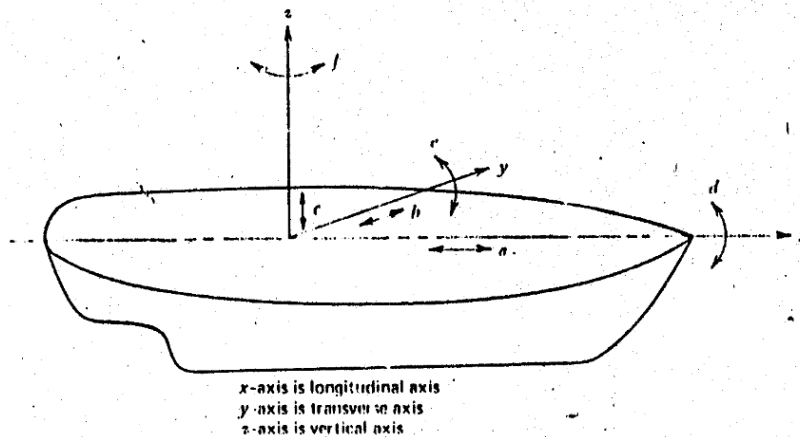
Pada kapal terdapat tiga jenis gerakan, yaitu *heave*, *roll*, dan *pitch* yang merupakan gerakan yang murni dari kapal. Tiga jenis gerakan tersebut dipengaruhi oleh *restoring force* (gaya pengembali) atau momen ketika struktur terapung (dalam bentuk kapal) berada pada posisi setimbangnya. Gerakan yang lain (*surging*, *swaying*, dan *yawing*) tidak dapat mengembalikan kapal tersebut pada posisi setimbang, selain itu itu tidak adanya pengaruh *exciting force* (gaya luar) yang menyebabkan aktivitas gangguan dari arah kebalikannya (Bhattacharyya, 1978).

Gerakan osilasi pada kapal memiliki enam derajat kebebasan yaitu *surging*, *swaying*, *heaving*, *rolling*, *pitching*, dan *yawing*. Enam derajat kebebasan tersebut dapat dibedakan menjadi dua macam mode gerak, yaitu translasional dan rotasional:

1. Moda gerak translasional:
  - a. *Surging* : Gerak osilasi translasional pada sumbu-x
  - b. *Swaying* : Gerak osilasi translasional terhadap sumbu-y
  - c. *Heaving* : Gerak osilasi translasional terhadap sumbu-z
2. Moda gerak rotasional:

- a. *Rolling* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-x
- b. *Pitching* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-y
- c. *Yawing* : Gerak osilasi rotasional terhadap sumbu-z

Pengertian gerakan *floating structure* dalam enam derajat kebebasan dapat dijelaskan melalui Gambar di bawah ini. Dengan menggunakan konversi sumbu tangan kanan tiga gerakan translasi pada arah sumbu x, y dan z adalah masing-masing gerakan *surge*, *sway* dan *heave*, sedangkan gerakan rotasi terhadap ketiga sumbu adalah *roll*, *pitch* dan *yaw*. Gambar 2.3 di bawah ini menjelaskan ilustrasi enam derajat kebebasan pada bangunan apung



**Gambar 2.3** *Six degree of freedom* pada Bangunan Apung  
 (Sumber: Bhattacharyya, 1978)

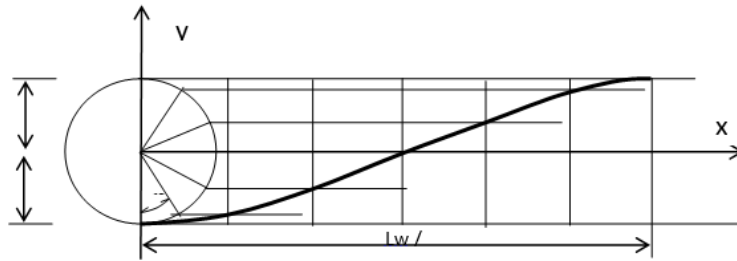
Aturan persamaan gerak untuk suatu bangunan apung dan beban *crane* adalah nonlinier seperti parametrik, jika variasi tegangan diperhitungkan. Ada kondisi dimana amplitudo osilasi besar pada beban yang berkaitan dengan eksitasi parametrik. Efek parametric eksitasi beban *crane* selama operasi *lifting* lebih signifikan untuk laut yang *random* dibandingkan dengan laut regular tetapi masih mempengaruhi operabilitas bangunan apung berdasarkan gerakan beban *crane*. Efek parametrik dari eksitasi adalah meningkatkan

gerakan beban *crane* pada *seastate* (Witz, 1995). Bangunan apung yang dimaksud dalam permasalahan ini adalah FSO Arco Ardjuna.

Pada kondisi kesetimbangan sebuah bangunan apung akan mencapai posisi setimbang diantara gaya apung dan gravitasi. Ketika gaya apung yang dihasilkan lebih besar daripada berat struktur, maka bangunan apung tersebut akan bergerak secara terus-menerus sampai struktur tersebut mencapai posisi kesetimbangannya. Dalam frekuensi tertentu, berat struktur lebih besar daripada gaya apung, yang berpengaruh terhadap gerakan struktur. Ketika kapal dalam proses mencapai posisi kesetimbangan, kecepatan kapal akan berkurang sampai kesetimbangan dicapai. Pada kondisi ini, gaya apung (*buoyancy*) akan sama dengan berat struktur karena momentum bangunan apung akan bergerak lebih jauh dari posisi semula. Gerakan bangunan apung akan tidak terbatas disaat tidak ada gaya redaman (*damping force*), yang selalu bekerja berlawanan dengan arah gerakan.

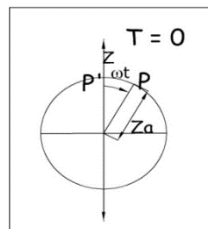
#### **2.2.4 Gelombang Sinusoidal**

Pada pergerakan *floating structure* tidak bisa terlepas dari pengaruh gelombang. Pada kenyataannya gelombang yang terjadi pada FSO Arco Ardjuna adalah gelombang acak, dan untuk memperhitungkan gelombang yang demikian sangat sulit. Maka perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui gerakan harmonis. Pada pengerjaan tugas akhir ini, batasan masalah yang digunakan pada analisa FSO Arco Ardjuna ini adalah gelombang dianggap sebagai gelombang reguler, yaitu gelombang sinusoidal. Pada gelombang tersebut dapat diproyeksikan menjadi sebuah lingkaran yang tiap titik pada garis berpotongan terhadap titik pada diameter lingkaran. Lebih jelasnya dapat dilihat dari ilustrasi Gambar 2.4 di bawah ini yang mengilustrasikan gelombang sinusoidal.



**Gambar 2.4.** Gelombang sinusoidal  
(Sumber: Bhattacharyya, 1978)

Berdasarkan Gambar di atas dapat dijelaskan bahwa proyeksi dari gelombang adalah sebuah lingkaran yang memiliki sudut yaitu  $\omega$  dan pada tiap gelombang pada fungsi  $t$  dengan asumsi titik  $p$  sebagai vektor dari lingkaran. Sehingga lingkaran ini dapat disederhanakan menjadi vektor dari *simple harmonic motion* seperti pada Gambar 2.5 di bawah ini.



**Gambar 2.5** Vektor dari *simple harmonic motion*  
(Sumber: Bhattacharyya, 1978)

Penjelasan Gambar diatas memperlihatkan harga dari titik pusat  $O$  terhadap  $P'$ :

$$(\overline{OP'}) = z = z_a \cos \omega t \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Kecepatan dari } P = v = \dot{z} = \frac{dz}{dt} = -z_a \omega^2 \sin \omega t \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{Percepatan dari } P = a = \ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2} = -z_a \omega^2 \cos \omega \dots\dots\dots (2.3)$$

Periode dari gerakan adalah waktu yang dibutuhkan dari  $P'$  untuk mencapai dari titik  $z$  dan bergerak ke  $z$  lagi dalam satu kejadian, dapat di rumuskan sebagai:



$$T = \frac{2\pi z_a}{\omega z_a} = \frac{2\pi}{\omega} \dots\dots\dots (2.4)$$

dengan frekuensi karakteristiknya  $f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots (2.5)$

sehingga frekuensi sudutnya adalah  $\omega = \frac{2\pi}{T} \dots\dots\dots (2.6)$

Dalam buku *Dynamic of Marine Vehicles* dijelaskan bahwa kecepatan, panjang gelombang, dan periode gelombang di perhitungkan :

$$V_w = \frac{gL_w}{2\pi} \tan h \frac{2\pi h}{L_w} \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan :

$V_w$  = kecepatan gelombang ( $m/s$ )

$g$  = gravitasi ( $m/s^2$ )

$L_w$  = panjang gelombang ( $m$ )

$h$  = kedalaman ( $m$ )

karena nilai dari perbandingan  $\frac{h}{L_w} \gg 0$

$$\tanh \frac{2\pi h}{L_w} \rightarrow \frac{2\pi h}{L_w} = kh \dots\dots\dots (2.8)$$

disubstitusikan :

$$V_w = \sqrt{gh}$$

$$T_w = \sqrt{\frac{2\pi L_w}{g}}$$

dan

$$\omega_w = \frac{2\pi}{T_w} \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan:

$T_w$  = Periode gelombang (s)

$\omega_w$  = Frekuensi gelombang (rad/sec)

### 2.2.5 Heading (Arah) Kapal terhadap Arah Gelombang

Selain faktor gelombang, ada juga faktor gelombang papasan, yaitu ketika gelombang berpapasan dengan kapal. Dalam ilustrasinya di perlihatkan sebagai berikut :

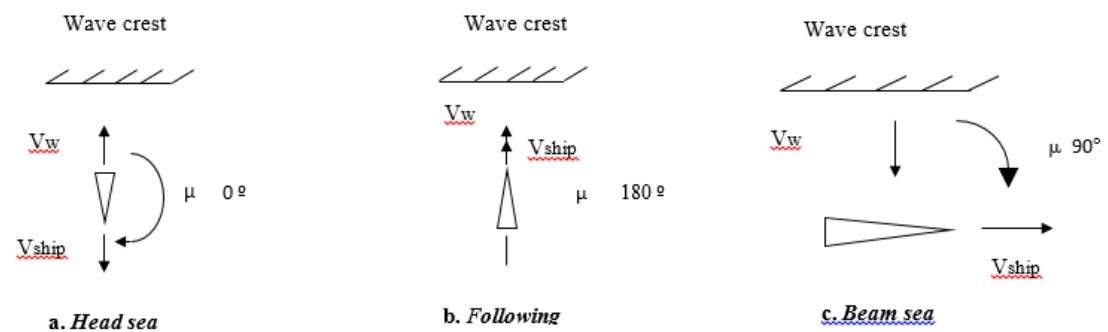
$$T_{\theta} = \frac{L_w}{V_w - V \cos \mu} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$V_w = \omega_{\theta} \left(1 - \frac{V}{V_w} \cos \mu\right) \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan:

- $T_{\theta}$  = Periode *encountering* (s)
- $V_w$  = Kecepatan gelombang (m/s)
- $V$  = Kecepatan kapal (knot)
- $\mu$  = Sudut datang gelombang
- $\omega_{\theta}$  = Frekuensi *encountering* (rad/sec)
- $L_w$  = Panjang gelombang (m)

Sebagai Gambaran arah kapal terhadap arah gelombang untuk kondisi *head sea*, *following sea*, *beam sea* dapat dilihat pada Gambar 2.6 di bawah ini :



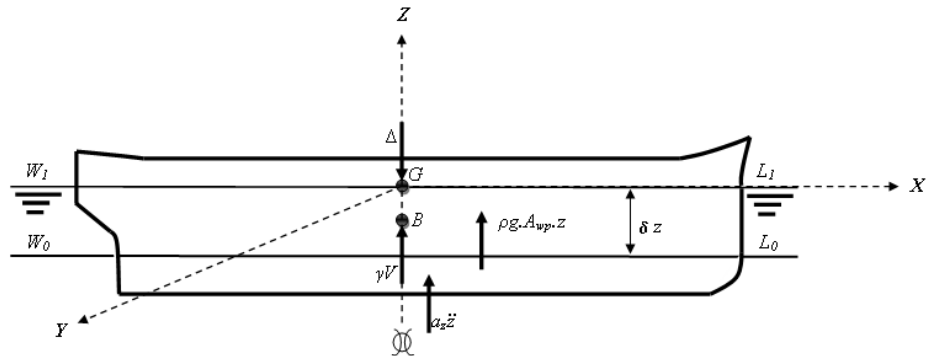
**Gambar 2.6** Definisi arah datang gelombang terhadap *heading* kapal

(Sumber: Bhattacharyya, 1978)

### 2.2.6 Gerakan Heave Murni (*Uncouple Heaving Motion*)

Pada *heaving* gaya ke bawah akibat dari berat kapal membuat kapal tercelup ke air lebih dalam dan kembali ke awal hingga diperoleh kesetimbangan kapal. Ketika gaya *buoyancy* lebih besar akibat kapal tercelup, kapal akan

bergerak vertikal ke atas, ketika posisi kapal telah setimbang kapal akan tetap naik dikarenakan ada pengaruh momentum. Selanjutnya kejadiannya akan berulang. Berikut adalah ilustrasi mengenai gerakan *heaving* seperti pada Gambar 2.7 di bawah ini:



**Gambar 2.7** Ilustrasi gerakan *heaving* pada bangunan apung  
(Sumber: Murtedjo 1999)

Dengan keterangan Gambar sebagai berikut:

- $\Delta$  : Displacement kapal
- G : Titik tangkap gaya berat ( Titik berat )
- B : Titik tangkap gaya tekan keatas ( Titik *bouyancy* )
- $\gamma V$  : Gaya tekan keatas
- $W_0L_0$  : *Water line* keadaan awal
- $W_1L_1$  : *Water line* keadaan *heave*
- $a_z \ddot{z}$  : Tambahan gaya tekan keatas karena *added mass*
- $\delta_z$  : Besar jarak simpangan *heave*

Maka dapat dituliskan persamaan umum pada kapal kondisi *heaving* adalah :

$$a_z \ddot{z} + b \dot{z} + cz = F_0 \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.12)$$

dengan:

- $a_z \ddot{z}$  : *Inertial force*
- $b \dot{z}$  : *Damping force*
- $cz$  : *Restoring force*
- $F_0 \cos \omega_e t$  : *Exciting force*

Terdapat empat elemen penting dalam gerakan *heave*, antara lain:

1. *Inertial force (a $\ddot{z}$ )*

Merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978).

$$a \frac{d^2z}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah}$$

$$a \frac{d^2z}{dt^2} = M \frac{d^2z}{dt^2} + a_z \frac{d^2z}{dt^2} \dots \dots \dots (2.13)$$

dengan:

M : Massa dari kapal

$a_z$  : Massa tambah

2. *Damping force (b $\dot{z}$ )*

*Damping force* selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal dan menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitude gerakan.

$$F_b = -b \frac{dz}{dt} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana b adalah koefisien untuk gaya damping kondisi *heaving*. Normalnya koefisien *damping* ini bergantung pada faktor:

- a. Tipe dari gerakan osilasi
- b. Frekuensi *encountering*
- c. Bentuk kapal

3. *Restoring force (cz)*

*Restoring force* untuk *heaving* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

$$cz = \rho \cdot g \cdot A_{wp} \cdot z$$

$$cz = \rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp} \cdot z \dots \dots \dots (2.15)$$

dengan:

$A_{wp}$  : *Water plane area* (m<sup>2</sup>)

z : Simpangan gerak *heaving* (m)

$C_{wp}$  : Koefisien *water plane area*

- $\rho$  : massa jenis air laut (1025 kg/ m<sup>3</sup>)
- $g$  : kecepatan gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)

4. *Exciting force (F)*

Gaya eksitasi pada *heaving* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.16)$$

dengan:

- $F_o$  : Amplitudo gaya eksitasi (m)
- $\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (Rad/sec)

**2.2.7 Gerakan Sway Murni (*Uncouple Swaying Motion*)**

*Sway* merupakan gerak translasi kapal dengan sumbu Y sebagai pusat gerak.

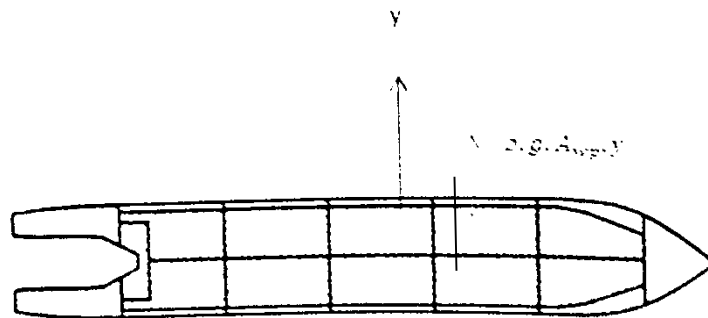
Persamaan umum kapal pada kondisi *swaying* adalah:

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan:

- $a\ddot{y}$  : *Inertial force*
- $b\dot{y}$  : *Damping force*
- $cy$  : *Restoring force*
- $F_o \cos \omega_e t$  : *Exciting force*

Gambar 2.8 di bawah ini menjelaskan ilustrasi gerakan sway yang terjadi pada bangunan apung.



**Gambar 2.8** Ilustrasi Gerakan *Swaying* pada bangunan apung  
(Sumber: Murtedjo 1999)

Terdapat empat elemen penting dalam gerakan *sway*, antara lain:

1. *Inertial force* ( $a\ddot{y}$ )

Merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978).

$$a \frac{d^2y}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah}$$

$$a \frac{d^2y}{dt^2} = M \frac{d^2y}{dt^2} + a_y \frac{d^2y}{dt^2} \dots \dots \dots (2.18)$$

dengan:

- M : Massa dari kapal
- $a_y$  : Massa tambah

2. *Damping force* ( $b\dot{y}$ )

*Damping force* selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal dan menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitude gerakan.

$$F_b = -b \frac{dy}{dt} = b \cdot \dot{y} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana b adalah koefisien untuk gaya damping kondisi *swaying*. Normalnya koefisien *damping* ini bergantung pada faktor:

- a. Tipe dari gerakan osilasi
- b. Frekuensi *encountering*
- c. Bentuk kapal

3. *Restoring force* ( $c\dot{y}$ )

*Restoring force* untuk *swaying* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

$$c_z = \rho \cdot g \cdot A_{wp} \cdot y$$

$$c_z = \rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp} \cdot y \dots \dots \dots (2.20)$$

dengan:

- $A_{wp}$  : *Water plane area* ( $m^2$ )
- $y$  : Simpangan gerak *swaying* (m)

- $C_{wp}$  : Koefisien *water plane area*
- $\rho$  : massa jenis air laut (1025 kg/ m<sup>3</sup>)
- $g$  : kecepatan gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)

4. *Exciting force (F)*

Gaya eksitasi pada *heaving* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.21)$$

dengan:

- $F_o$  : Amplitudo gaya eksitasi (m)
- $\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (Rad/sec)

**2.2.8 Gerakan Surge Murni (*Uncouple Surging Motion*)**

*Surge* merupakan gerak translasi kapal dengan sumbu X sebagai pusat gerak.

Persamaan umum pada kapal kondisi *surging* adalah:

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.22)$$

dengan:

- $a\ddot{x}$  : *Inertial force*
- $b\dot{x}$  : *Damping force*
- $cx$  : *Restoring force*
- $F_o \cos \omega_e t$  : *Exciting force*

Terdapat empat elemen penting dalam gerakan *surge*, antara lain:

1. *Inertial force (a $\ddot{x}$ )*

Merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978).

$$a \frac{d^2x}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah}$$

$$a \frac{d^2x}{dt^2} = M \frac{d^2x}{dt^2} + a_x \frac{d^2x}{dt^2} \dots\dots\dots (2.23)$$

dengan:

M : Massa dari kapal

$a_x$  : Massa tambah

2. *Damping force* ( $b\dot{x}$ )

*Damping force* selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal dan menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitude gerakan.

$$F_b = -b \frac{dx}{dt} = b \cdot \dot{x} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana b adalah koefisien untuk gaya damping kondisi surging. Normalnya koefisien damping ini bergantung pada faktor:

- a. Tipe dari gerakan osilasi
- b. Frekuensi *encountering*
- c. Bentuk kapal

3. *Restoring force* ( $cx$ )

*Restoring force* untuk *surging* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

$$cz = \rho \cdot g \cdot A_{wp} \cdot x$$

$$cz = \rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp} \cdot x \dots\dots\dots (2.25)$$

dengan:

$A_{wp}$  : *Water plane area* ( $m^2$ )

$x$  : Simpangan gerak *surging* (m)

$C_{wp}$  : Koefisien *water plane area*

$\rho$  : massa jenis air laut ( $1025 \text{ kg/ m}^3$ )

$g$  : kecepatan gravitasi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

4. *Exciting force* ( $F$ )

Gaya eksitasi pada *heaving* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.26)$$



dengan:

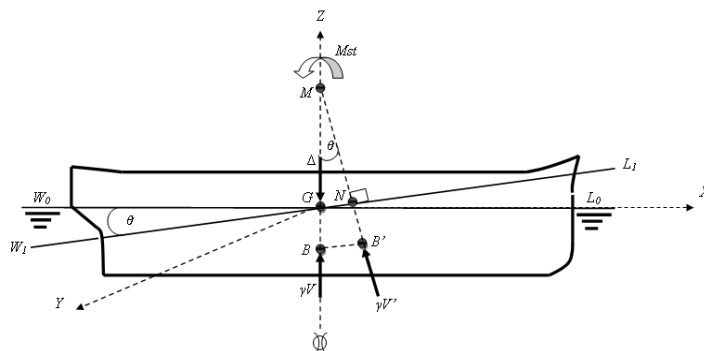
$F_0$  : Amplitudo gaya eksitasi (m)

$\omega_e$  : Frekuensi gelombang *encountering* (Rad/sec)

### 2.2.9 Gerakan *Pitch Murni (Uncouple Pitching Motion)*

Pada penyelesaian tuhas akhir ini, kondisi selain *heaving* yang perlu diperhitungkan adalah *pitching*. Dimana akibat dari enam derajat kebebasan dari gerak kapal. Berbeda halnya dengan *heaving* yang bergerak secara translasional. Namun kondisi *pitching* bergerak secara rotasional sehingga pendekatan perhitungan yang dapat ditetapkan adalah hukum Euler.

Konstruksi benda apung dapat mengalami *simple harmonic motion* yang berupa gerakan dalam arah sumbu transversal (x) maupun arah sumbu longitudinal (y) apabila benda apung tersebut mengalami perpindahan posisi keseimbangannya dan kemudian dilepaskan atau pada benda apung tersebut dikenakan suatu kecepatan awal sehingga bergerak menjauh dari posisi keseimbangannya. Dalam berbagai analisis perhitungan gerakan benda apung mengalami gerakan angular seperti benda apung yang mengalami gerakan *rolling* dan *pitching*, maka perhitungan dan analisa terhadap besarnya gaya momen memegang peranan yang lebih penting dibandingkan dengan perhitungan besarnya gaya itu sendiri. Pada Gambar 2.9 di bawah ini adalah ilustrasi gerakan *pitching*.



**Gambar 2.9** Ilustrasi gerakan *pitching* pada bangunan apung  
(Sumber: Murtedjo 1999)

*Pitching* merupakan gerak rotasional dengan sumbu Y sebagai pusat gerak. Karena gerak *pitching* akan berpengaruh terhadap *initial velocity* dari kesetimbangan posisi, maka momen yang terjadi akibat *pitching* perlu diperhitungkan. Rumus umum dari persamaan gerakan akibat *pitching* adalah:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.27)$$

dengan:

- $M_o$  = amplitudo momen eksitasi (m)
- $\omega_e$  = frekuensi gelombang encountering (rad/sec)
- $a\ddot{\theta}$  = Inertial Moment
- $b\dot{\theta}$  = Damping Moment
- $c\theta$  = Restoring Moment
- $M_o \cos \omega_e t$  = Exciting Moment

Karena merupakan gerak rotasional pada gerakan akibat *pitching* terdapat empat jenis momen yang bekerja, yaitu:

1. *Inertial moment* ( $a, \ddot{\theta}$ )

$a$  merupakan *moment inertia virtual mass* dari  $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ , dengan  $\frac{d^2\theta}{dt^2}$  adalah percepatan angular dari *pitching*, *moment inertia virtual mass* pada kondisi *pitching* adalah *moment inertia* kapal ditambah *moment inertia* massa tambah dari *pitching* (Bhattacharyya, 1978).

$$a = I_{yy} + \delta I_{yy}$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k^2_{yy} + \delta I_{yy} \dots\dots\dots (2.28)$$

dengan:

- $\delta I_{yy}$  : *Moment Inertia* massa tambah untuk gerakan *pitching*
- $k^2_{yy}$  : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *pitching*
- $I_{yy}$  : *Moment inertia* massa kapal

Menurut Bhattacharyya diasumsikan bahwa distribusi massa secara *longitudinal* adalah sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*.

Sehingga distribusi *vertical* tidak begitu berpengaruh dan bahwa CG dari kapal diasumsikan di *midship section*. Secara pendekatan jari-jari girasinya *pitching* adalah:

$$k^2_{yy} = 0,24L \text{ to } 0,26L$$

2. *Damping moment* ( $b, \dot{\theta}$ )

*Damping coefficient* untuk *pitching* dapat dihitung dengan pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap station dan di integrasikan sebanyak station sepanjang kapal.

3. *Restoring moment* ( $c, \theta$ )

*Restoring moment* untuk *pitching* dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \theta \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 y(x) dx$$

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \theta \cdot I_y \dots \dots \dots (2.29)$$

Jari-jari metacenter memanjang  $\overline{M.B_L} = \frac{I_y}{\nabla}$ , sehingga

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \overline{M.B_L} \cdot \nabla \cdot \theta = \rho \cdot g \cdot \overline{M.G_L} \cdot \nabla \cdot \theta \text{ (sudut kecil)}$$

$$c\theta = \Delta \cdot \overline{M.G_L} \cdot \theta \dots \dots \dots (2.30)$$

dengan:

$c$  : *Restoring moment coefficient*

$I_y$  : *Moment inersia water plane area*

$\rho$  : *massa jenis air laut (1025 kg/ m<sup>3</sup>)*

$g$  : *kecepatan gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)*

$\nabla$  : *Volume displacement (m<sup>3</sup>)*

$\Delta$  : *Displacement (Ton) =  $\rho \cdot g \cdot \nabla$*

$\overline{M.B_L}$  : *Jari-jari metacenter memanjang*

$\overline{M.G_L}$  : *Tinggi metacenter memanjang*

4. *Exciting moment*

*Exciting moment* untuk *pitching* dikarenakan tidak seimbang momen akibat dari gelombang tranverse axis dari kapal. Pada waktu *heaving pitching*

moment dapat dengan mudah di naikan, ini berarti distribusi tekanan hidrostatik dirumuskan:

$$M_{\theta} = M_o \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

**2.2.10 Gerakan *Roll Murni (Uncouple Rolling Motion)***

Kapal menjalani gerakan harmonis sederhana terhadap koordinat axis secara transversal maupun longitudinal. *Rolling* merupakan gerak rotasional dengan sumbu X sebagai pusat gerakanya. Gerakan ini akan berpengaruh terhadap *initial velocity* sehingga perlu dilakukan perhitungan terhadap momen gaya.

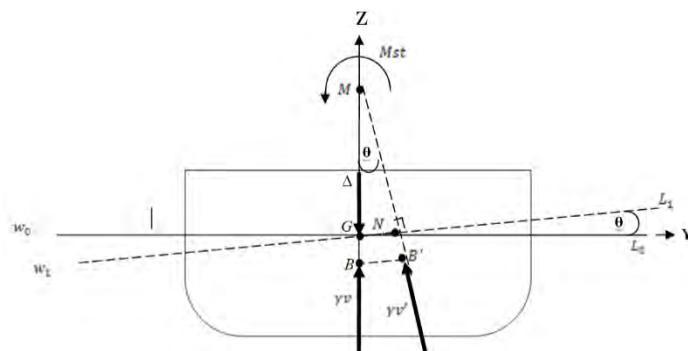
Rumus umum dari persamaan gerak akibat rolling ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

Dengan:

- $M_o$  = Amplitudo momen eksitasi (m)
- $\omega_e$  = Frekuensi gelombang encountering (rad/sec)
- $a\ddot{\phi}$  = *Inertial moment*
- $b\dot{\phi}$  = *Damping Moment*
- $c\phi$  = *Restoring Moment*
- $M_o \cos \omega_e t$  = *Exciting moment*

Pada Gambar 2.10 di bawah ini dilustrasikan gerakan rolling pada bangunan apung.



**Gambar 2.10** Ilustrasi gerakan *rolling* pada bangunan apung  
(Sumber: Murtedjo 1999)

Karena merupakan gerak rotasional pada gerakan akibat *rolling* terdapat empat jenis momen yang bekerja, yaitu:

1. *Inertial moment* ( $a, \ddot{\phi}$ )

$a$  merupakan *moment inertia virtual mass* dari  $\frac{d^2\phi}{dt^2}$ , dengan  $\frac{d^2\phi}{dt^2}$  adalah percepatan angular dari *rolling*, *moment inertia virtual mass* pada kondisi *rolling* adalah *moment inertia* kapal ditambah *moment inertia* massa tambah dari *rolling* (Bhattacharyya, 1978).

$$a = I_{xx} + \delta I_{xx}$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k^2_{xx} + \delta I_{xx} \dots \dots \dots (2.33)$$

dengan:

- $\delta I_{xx}$  : *Moment Inertia* massa tambah untuk gerakan *rolling*
- $k^2_{xx}$  : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *rolling*
- $I_{xx}$  : *Moment inertia* massa kapal

Menurut Bhattacharyya diasumsikan bahwa distribusi massa secara *longitudinal* adalah sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*. Sehingga distribusi *vertical* tidak begitu berpengaruh dan bahwa CG dari kapal diasumsikan di *midship section*. Secara pendekatan jari-jari girasinya *rolling* adalah:

$$k^2_{xx} = 0,33xB$$

2. *Damping moment* ( $b, \dot{\phi}$ )

*Damping coefficient* adalah koefisien redaman dan  $b \frac{d\phi}{dt}$  merupakan momen redaman. *Damping coefficient* untuk *rolling* dapat dihitung dengan pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap station dan di integrasikan sebanyak station di kapal.

3. *Restoring moment* ( $c, \phi$ )

*Restoring moment* untuk *rolling* dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^2 x(y) dy$$

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \cdot I_x \dots\dots\dots (2.34)$$

Jari-jari metacenter melintang  $\overline{M.B_T} = \frac{I_T}{\nabla}$ , sehingga

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \overline{M.B_T} \cdot \nabla \cdot \phi = \rho \cdot g \cdot \overline{M.G_T} \cdot \nabla \cdot \phi$$

$$c\theta = \Delta \cdot \overline{M.G_T} \cdot \phi \dots\dots\dots (2.35)$$

dengan:

- $c$  : Restoring moment coefficient
- $I_x$  : Moment inersia dari beban *water plane area*
- $\rho$  : massa jenis air laut (1025 kg/ m<sup>3</sup>)
- $g$  : kecepatan gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $\nabla$  : Volume displacement (m<sup>3</sup>)
- $\Delta$  : Displacement (Ton) =  $\rho \cdot g \cdot \nabla$
- $\overline{M.B_T}$  : Jari-jari metacenter melintang
- $\overline{M.G_T}$  : Tinggi metacenter melintang

4. *Exciting moment*

*Exciting moment* untuk *rolling* dikarenakan tidak seimbang momen akibat dari gelombang tranverse axis dari kapal. *Rolling moment* dapat dengan mudah di naikan, ini berarti distribusi tekanan hidrostatis dirumuskan:

$$M_\theta = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.36)$$

**2.2.11 Gerakan Yaw Murni (*Uncouple Yawing Motion*)**

Kapal menjalani gerakan harmonis sederhana terhadap koordinat axis secara transversal maupun longitudinal. Gerakan tersebut akan berpengaruh pada *initial velocity* dari kesetimbangan posisi, sehingga perlu untuk memperhitungkan momen dari gaya. Karena merupakan gerak rotasional, pada gerakan *yawing* (gerak rotasional kapal dengan sumbu Z) terdapat empat jenis momen yang bekerja

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.37)$$

dengan:

- $M_o$  = amplitudo momen eksitasi (m)

$\omega_e$  = frekuensi gelombang *encountering* (rad/sec)

$a\ddot{\phi}$  = *Inertial Moment*

$b\dot{\phi}$  = *Damping Moment*

$c\phi$  = *Restoring Moment*

$M_o \cos \omega_e t$  = *Exciting Moment*

Berikut penjelasannya :

1. *Inertial moment (a,  $\ddot{\phi}$ )*

$a$  merupakan *moment inertia virtual mass* dari  $\frac{d^2\phi}{dt^2}$ , dengan  $\frac{d^2\phi}{dt^2}$  adalah percepatan angular dari *yawing*, *moment inertia virtual mass* pada kondisi *yawing* adalah *moment inertia* kapal ditambah *moment inertia* massa tambah dari *yawing* (Bhattacharyya, 1978).

$$a = I_{zz} + \delta I_{zz}$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k^2_{zz} + \delta I_{zz} \dots\dots\dots (2.38)$$

dengan:

$\delta I_{zz}$  : *Moment Inertia* massa tambah untuk gerakan *yawing*

$k^2_{zz}$  : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *yawing*

$I_{zz}$  : *Moment inertia* massa kapal

Menurut Bhattacharyya diasumsikan bahwa distribusi massa secara *longitudinal* adalah sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*. Sehingga distribusi *vertical* tidak begitu berpengaruh dan bahwa CG dari kapal diasumsikan di *midship section*. Secara pendekatan jari-jari girasinya *yawing* adalah:

$$k^2_{zz} = 0,24L \text{ to } 0,26L$$

2. *Damping moment (b,  $\dot{\phi}$ )*

*Damping coefficient* adalah koefisien redaman dan  $b \frac{d\phi}{dt}$  merupakan momen redaman. *Damping coefficient* untuk *yawing* dapat dihitung dengan pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap station dan di integrasikan sebanyak station di kapal.

3. *Restoring moment (c, φ)*

*Restoring moment* untuk yawing dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^2 x(y) dy$$

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \cdot I_x \dots\dots\dots (2.39)$$

Jari-jari metacenter melintang  $\overline{M.B_T} = \frac{I_x}{\nabla}$ , sehingga

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \overline{M.B_T} \cdot \nabla \cdot \phi = \rho \cdot g \cdot \overline{M.G_T} \cdot \nabla \cdot \phi$$

$$c\theta = \Delta \cdot \overline{M.G_T} \cdot \phi \dots\dots\dots (2.40)$$

dengan:

- $c$  : *Restoring moment coefficient*
- $I_x$  : *Moment inersia dari beban water plane area*
- $\rho$  : *massa jenis air laut (1025 kg/ m<sup>3</sup>)*
- $g$  : *kecepatan gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)*
- $\nabla$  : *Volume displacement (m<sup>3</sup>)*
- $\Delta$  : *Displacement (Ton) =  $\rho \cdot g \cdot \nabla$*
- $\overline{M.B_T}$  : *Jari-jari metacenter melintang*
- $\overline{M.G_T}$  : *Tinggi metacenter melintang*

4. *Exciting moment*

*Exciting moment untuk rolling* dikarenakan tidak seimbang momen akibat dari gelombang tranverse axis dari kapal. *Rolling moment* dapat dengan mudah di naikan, ini berarti distribusi tekanan hidrostatik dirumuskan:

$$M_\theta = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.41)$$

**2.2.12 Gerakan Couple Six Degree of Freedom**

Karena bangunan apung yang ditinjau terdiri dari enam mode gerakan bebas (*six degree of freedom*), dengan asumsi bahwa gerakan-gerakan osilasi tersebut adalah linier dan harmonik, maka persamaan diferensial gerakan kopel dapat dituliskan sebagai berikut:



$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\xi_k + B_{jk}\xi_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \dots\dots\dots (2.42)$$

dengan:

$M_{jk}$  = komponen matriks massa kapal

$A_{jk}, B_{jk}$  = matriks koefisien massa tambah dan redaman

$C_{jk}$  = koefisien-koefisien gaya hidrostatis pengembali

$F_j$  = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks

$F_1, F_2,$  dan  $F_3$  adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge, sway,* dan *heave,* sedangkan  $F_4, F_5,$  dan  $F_6$  adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll, pitch,* dan *yaw.*

### 2.2.13 Konsep Pembebanan

Dalam proses perancangan struktur apung lepas pantai (*floating offshore structure*), penentuan kemampuan kerja struktur oleh beban yang bekerja pada struktur tersebut. Perancangan *floating offshore structure* terlebih dahulu. Beban-beban yang harus dipertimbangkan dalam perancangan *floating offshore structure* adalah beban internal dan beban eksternal :

1. LWT

LWT (*lightweight*) adalah berat kapal kosong konstruksi kapal tersebut, berat permesinan dan berat peralatan. Dimana dalam tugas akhir ini berat yang ditinjau untuk perhitungan motion adalah LWT dikarenakan kapal dengan berat kosong akan mengakibatkan kondisi ekstrem dalam pembebanan dinamis.

2. DWT

DWT (*deadweight*) adalah berat kapal dimana terdiri dari berat muatan, bahan bakar, pelumas, air tawar, perbekalan juga berat yang ditimbulkan oleh awak kapal tersebut.

3. Beban lingkungan (*environmental load*)

Beban lingkungan adalah beban yang terjadi karena dipengaruhi oleh lingkungan dimana suatu struktur lepas pantai dioperasikan atau bekerja.

Pada tugas akhir ini pembebanan difokuskan pada beban yang mengenai *crane*. *Crane* pada kondisi operasional terdapat dalam lingkungan dinamis, seperti pengangkatan (*lifting*), pengayunan (*swing*), dan arus udara serta variasi suhu. Namun, yang akan ditinjau pada tugas akhir ini adalah beban gelombang beban angin, dan beban operasi *crane*

#### **2.2.14 Beban Gelombang**

Widodo (2010), dalam penelitiannya menyebutkan bahwa beban yang dapat menyebabkan terjadinya kelelahan pada struktur adalah beban yang bersifat siklik. Dalam tugas akhir ini akan divariasikan berbagai kondisi pembebanan gelombang dengan mengacu pada data kondisi lingkungan tempat FSO dan SPM beroperasi. Gelombang yang digerakkan oleh angin adalah komponen utama dari beban lingkungan yang mempengaruhi struktur bangunan apung lepas pantai. Gelombang-gelombang tersebut bersifat random, bervariasi berdasarkan tinggi dan panjang, dan untuk aplikasi pada bangunan apung lepas pantai perlu dilakukan pendekatan dengan memvariasikan gelombang lebih dari satu arah secara serempak. Karena kondisi gelombang yang acak, *sea-state* biasanya dijabarkan dalam bentuk statistik parameter gelombang seperti tinggi gelombang, periode puncak spektral, bentuk spektral dan arah gelombang.

#### **2.2.15 Beban Arus**

Beban arus dapat dimodelkan sebagai tambahan pada beban gelombang yang diaplikasikan. Penerapan beban arus dapat dilakukan sebagai masukan konstan atau dengan menggunakan nilai kedalaman, kecepatan dan arah arus. Apabila *cable dynamics* digunakan dalam analisa maka pembebanan arus juga akan teraplikasikan sepanjang *cable* dengan menggunakan variabel kecepatan arus dan kedalaman

#### **2.2.16 Beban Angin**

Suatu struktur bangunan apung harus didesain agar dapat bertahan dari gas angin dengan kecepatan minimal 36 m/s pada saat kondisi operasi dan 51.5

m/s saat kondisi badai/*intach*, dan kecepatan angin 25.8 m/s untuk kondisi *damage*. Pengaruh gaya angin terhadap kekuatan global struktur tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan gaya gelombang. Pengaruh lokal gaya angin terhadap semua peralatan dan bagian struktur FSO harus dihitung demi keamanan.

Untuk menghitung kecepatan angin pada elevasi diatas 10 m dari permukaan air digunakan hukum *one-seventh power* (Dawson, 1983) yang dapat digunakan hingga kecepatan angin pada elevasi 600 ft (182.88 m). Persamaan tersebut :

$$V = V_0 \left(\frac{y}{10}\right)^{\frac{1}{7}} \dots\dots\dots (2.43)$$

dengan :

- V = kecepatan angin pada elevasi y (m/s)
- V<sub>0</sub> = kecepatan angin pada elevasi 10 m (m/s)
- y = elevasi yang akan dihitung kecepatannya (m)

Untuk perhitungan gaya angin yang mengenai struktur, dapat dicari dengan persamaan – persamaan berikut :

Berdasarkan ABS, 2001 :

$$F = \frac{1}{2} \rho C_s C_h A V^2 \dots\dots\dots (2.44)$$

dengan :

- F= gaya angin (N)
- ρ= massa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>) = 1.226 kg/m<sup>3</sup>
- C<sub>s</sub> = koefisien dari bentuk benda yang terkena angin
- C<sub>h</sub> = koefisien dari ketinggian benda
- A = area/luasan yang terkena angin (m<sup>2</sup>)
- V = kecepatan angin (m/s)

Berdasarkan DNV, 2007 :

$$F = CqS \sin \alpha \dots\dots\dots (2.45)$$

dengan :

C= koefisien bentuk

q= tekanan angin

S= daerah proyeksi normal terhadap arah gaya

$\alpha$ = sudut antara arah angin dan sumbu permukaan

Nilai tekanan angin  $q$  dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$q = \frac{1}{2} \rho a U_{Tz}^2 \dots \dots \dots (2.46)$$

dengan :

q= tekanan angin

$\rho a$  = massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ ) = 1.226  $\text{kg/m}^3$

$U_{Tz}$  = rata – rata kecepatan angin selama waktu interval T pada ketinggian z meter diatas rata – rata permukaan air atau daratan.

Untuk nilai kecepatan angin pada saat kondisi ekstrim, dapat menggunakan persamaan dibawah ini dengan kecepatan  $V_o$  pada ketinggian h diatas permukaan laut dengan rata–rata kecepatan angin U dan rata – rata ketinggian periode  $T_z$  atas permukaan laut.

$$U(T, z) = U_o \left\{ 1 + C \cdot \ln \frac{T}{T_o} \right\} \left\{ 1 - 0.41 \cdot I_U(z) \cdot \ln \frac{T}{T_o} \right\} \dots \dots \dots (2.47)$$

dengan :

$$h = 10 \text{ m}, T_o = 1 \text{ jam}, \text{ dan } T < T_o \dots \dots \dots (2.48)$$

dan

$$C = 5.73 \cdot 10^{-2} \sqrt{1 + 0.15 U_o} \dots \dots \dots (2.49)$$

$$I_U = 0.06 \cdot (1 + 0.043 U_o) \left( \frac{z}{h} \right)^{-0.22} \dots \dots \dots (2.50)$$

Dimana U akan memiliki *return periode* yang sama dengan  $U_o$ .

Berdasarkan uraian diatas maka persamaan yang lebih valid untuk menghitung beban angin pada saat kondisi ekstrim adala dengan menggunakan persamaan berdasarkan DNV. Nilai koefisien bentuk berdasarkan ABS dan DNV berbeda – beda tergantung pada bentuk benda

yang terkena angin. Nilai dari koefisien ( $C_s$ ) menurut ABS dapat dilihat dari Tabel 2.1

**Tabel 2.1** *Shape Coefficients for Wind Force Calculations*

<i>Shape of Structure</i>	$C_s$
<i>Spherical</i>	0.40
<i>Cylindrical shapes (all sizes) used for crane pedestals, booms, helidecks, etc</i>	0.50
<i>Hull, based on block projected area</i>	1.00
<i>Deck houses</i>	1.00
<i>Closters of deck houses and other structures, based on block projected area</i>	1.00
<i>Isolated structural shaped (ie.g., cranes, angle channel beams, etc)</i>	1.50
<i>Under deck areas (smooth)</i>	1.00
<i>Under deck surface (exposed beams and griders)</i>	1.30
<i>Rig derrick, cace face, assuming fabricated from angle</i>	1.25

(Sumber: ABS MODU Part 3, 2001)

Sedangkan nilai dari  $C_h$  dapat dilihat pada Tabel 2.2

**Tabel 2.2** *Wind Pressure Height Coefficient Above the Design Water Surface*

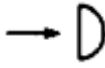
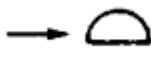
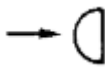
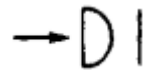

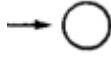
<b>Height (m)</b>	<b>Height (ft)</b>	<b>C<sub>b</sub></b>
0-15.3	0-50	1.00
15.3-30.5	50-100	1.10
30.5-46.6	100-150	1.20
46.6-61	150-200	1.30
61-76	200-250	1.37
76-91.5	250-300	1.43

91.5-106.5	300-350	1.48
------------	---------	------

(Sumber: ABS MODU Part 3, 2001)

Nilai dari koefisien (C) menurut DNV dapat dilihat pada Tabel 2.3

**Tabel 2.3** *Shapes Coefficients C for Sphere-Shaped Structure*

	<i>Structures</i>		Shape Coefficient
	Hollow hemisphere, concavity to wind		1.40
	Hollow hemisphere		0.35
	Hollow or solid hemisphere, concavity to leeward		0.40
	Solid hemisphere and circular disc		1.20
 	Hemisphere on horizontal plane		0.50
	Sphere	$Re \leq 4.2 \leq 10^5$	0.5
		$4.2 \times 10^5 < Re < 4.2 \times 10^6$	0.15
		$Re \geq 10^6$	0.20

(Sumber: DNV RP C205, 2007)

Nilai *Reynolds Number* (Re) diperoleh dengan persamaan :

$$Re = \frac{D \cdot U_{T,z}}{v_a} \dots \dots \dots (2.51)$$

dengan :

D = diameter (m)

$U_{T,z}$  = kecepatan angin pada elevasi z (m/ s)

$v_a$  = viskositas kinematis udara ( $1.55 \times 10^{-5}$ )

### 2.2.17 Response Amplitude Operator (RAO)

*Response Amplitude Operator* (RAO) atau sering disebut sebagai *Transfer Function* adalah fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai sebuah struktur lepas pantai. RAO juga disebut sebagai *Transfer Function* karena RAO merupakan alat untuk mentransfer beban luar (gelombang) dalam bentuk respon pada suatu struktur. *Response Amplitude Operator* (RAO) merupakan suatu fungsi respon struktur per meter amplitudo gelombang dalam rentang frekuensi tertentu. RAO dapat juga didefinisikan sebagai hubungan antara amplitudo respon terhadap amplitudo gelombang. Bentuk umum dari persamaan RAO dalam fungsi frekuensi adalah sebagai berikut (Chakrabarti, 1987):

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \dots\dots\dots (2.52)$$

Dimana:

$X_p(\omega)$  = amplitudo struktur

$\eta(\omega)$  = amplitudo gelombang

### 2.2.18 Spektrum Gelombang

Spektrum gelombang adalah karakteristik dari suatu gelombang pada perairan tertentu dimana intensitas gelombang dalam membentuk gelombang acak. Model matematik spektrum secara umum didasarkan pada 1 (satu) atau lebih parameter. Spektra gelombang dinyatakan dalam:

- bentuk spektrum kepadatan energi gelombang (spektrum gelombang)
- energi per 1 m<sup>2</sup> luas permukaan.

Spektrum gelombang JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) merupakan salah satu jenis spektrum yang sering digunakan dalam perhitungan

gelombang. Spektrum JONSWAP didasarkan pada percobaan yang dilakukan di *North Sea*. Berikut persamaan dari spektrum JONSWAP:

$$S(\omega) = a g^2 \omega^{-5} \exp \left[ -1.25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] \gamma^{\exp \left[ \frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2 \tau^2 \omega_0^2} \right]} \dots \dots \dots (2.53)$$

Dimana:

$S(\omega)$  = spektrum gelombang

$\gamma$  = parameter puncak (*peakedness parameter*)

$\tau$  = parameter bentuk (*shape parameter*)

untuk  $\omega \leq \omega_0 = 0.07$  dan  $\omega \geq \omega_0 = 0.9$

$a = 0.0076 (X_0) - 0.22$  , untuk  $X_0$  tidak diketahui  $a = 0.0081$

Sedangkan nilai dari parameter puncak ( $\gamma$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \gamma &= 5 \quad \text{for } T_p / \sqrt{H_s} \leq 3.6; \quad \text{and} \\ \gamma &= \exp \left( 5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right) \quad \text{for } T_p / \sqrt{H_s} > 3.6 \end{aligned} \dots \dots \dots (2.54)$$

Dimana:

$T_p$  = periode puncak spektra

$H_s$  = tinggi gelombang signifikan

### 2.2.19 Spektra Respon

Respon spektra didefinisikan sebagai respon energi dari struktur akibat energi gelombang. Pada sistem linier, respon spektra didapat dengan mengkuadratkan *RAO* yang kemudian dikalikan dengan spektra gelombang, yang secara persamaan matematis dapat ditulis dengan:



$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 \times S(\omega) \dots \dots \dots (2.55)$$

Dimana :

$S_R(\omega)$  = spektrum respon ( $m^2 - sec$ )

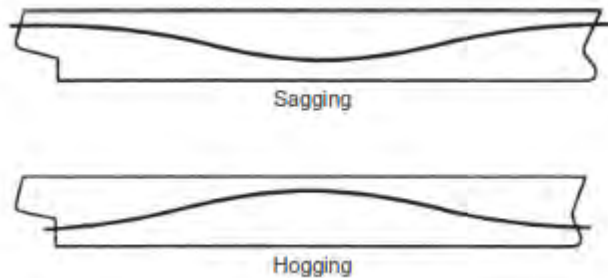
$S(\omega)$  = spektrum gelombang ( $m^2 - sec$ )

$RAO$  = *response amplitude operator*

$\omega$  = frekuensi gelombang (rad/sec)

### 2.2.20 Kekuatan Memanjang Kapal

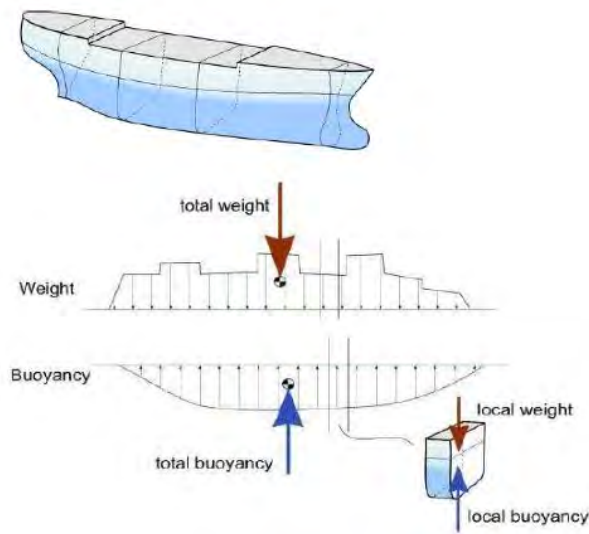
Dua kondisi yang perlu diperhatikan pada kekuatan memanjang kapal adalah suatu kondisi dimana puncak gelombang pada amidship dan kondisi puncak gelombang terdapat pada ujung-ujung kapal. Maka kapal akan mengalami *hogging* dan *sagging*. Pada kondisi tertentu *hogging* dan *sagging* mengalami nilai yang besar karena kondisi distribusi massa kapal seperti ilustrasi *sagging* dan *hogging* pada Gambar 2.11 di bawah ini:



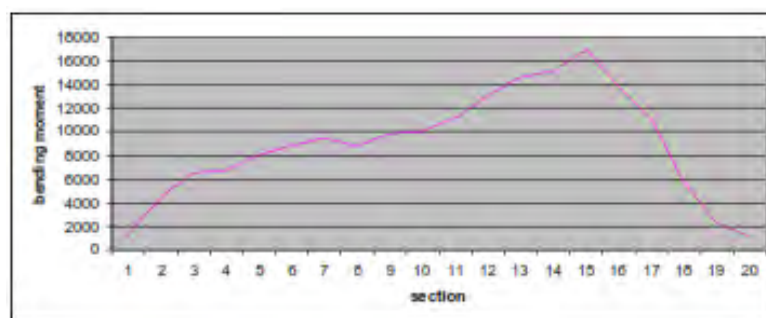
**Gambar 2.11** *Sagging* dan *hogging*  
 (Sumber: Eric Tupper, Introduction to Naval Architecture, 2002)

Pada dasarnya kekuatan memanjang kapal diakibatkan oleh gaya vertical yang dialami oleh grider badan kapal yakni gaya berat dan gaya buoyancy. Untuk suatu floating body harus sebanding dengan total buoyancy dan kedua

gaya tersebut harus beraksi sepanjang garis yang sama. Meskipun berat pada tiap lokasi sepanjang kapal tidak akan sebanding dengan *buoyancy*. Gaya berat dipengaruhi oleh kombinasi berat kapal dan berat muatan yang memiliki lokasi berat yang tetap, sedangkan gaya *buoyancy* dipengaruhi oleh bentuk badan kapal dan lokasi kapal pada air (*draft* dan *trim*) seperti ilustrasi pada Gambar 2.12 dan Gambar 2.13 yang menjelaskan pengaruh gaya berat dan *buoyancy* terhadap kekuatan memanjang di bawah ini.



**Gambar 2.12** Pengaruh berat bangunan apung dan *buoyancy* terhadap kekuatan memanjang  
(Sumber: google.com)



**Gambar 2.13** Gaya vertikal (*weight* dan *buoyancy*) yang mempengaruhi kekuatan memanjang kapal  
(Sumber : C.G. Daly, Ship Structure I)

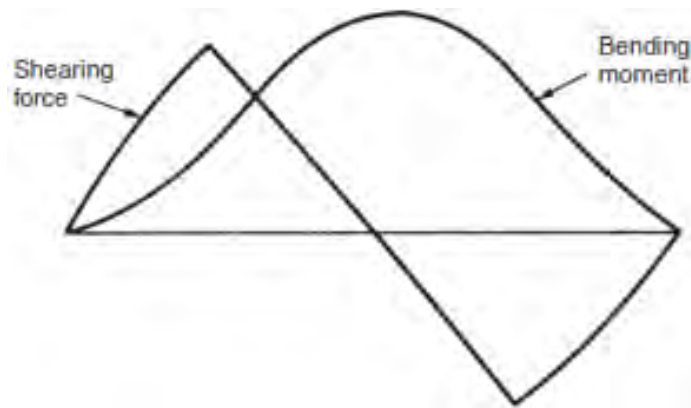
**2.2.21 Longitudinal Bending Moment Pada Still Water**

Jika A merupakan cross-sectional area pada suatu titik, beban per satuan panjang pada suatu titik adalah  $\rho g A - mg$ , *shearing force* (F) dan *Momen Bending* (M) dirumuskan sebagai berikut :

$$F = \int (\rho g A - mg) dx \dots\dots\dots (2.56)$$

$$M = \int F dx = \iint (\rho g A - mg) dx \cdot dx \dots\dots\dots (2.57)$$

Kurva *shearing force* dan *Momen Bending* ditunjukkan pada Gambar 2.14 berikut ini:



**Gambar 2.14** *Shearing force* dan *bending moment*  
(Sumber: Eric Tupper, Introduction to Naval Architecture, 2002)

**2.2.22 Longitudinal Bending Moment Pada Calm Water**

Pada air yang bergelombang bending momen dirumuskan sebagai berikut :

$$M = M_s + M_w \dots\dots\dots (2.58)$$

$$M_w = M_\zeta + M_z + M_\psi \dots\dots\dots (2.59)$$

keterangan :

M = Total *Momen bending*

$M_s$  = *Momen bending* pada *still water*

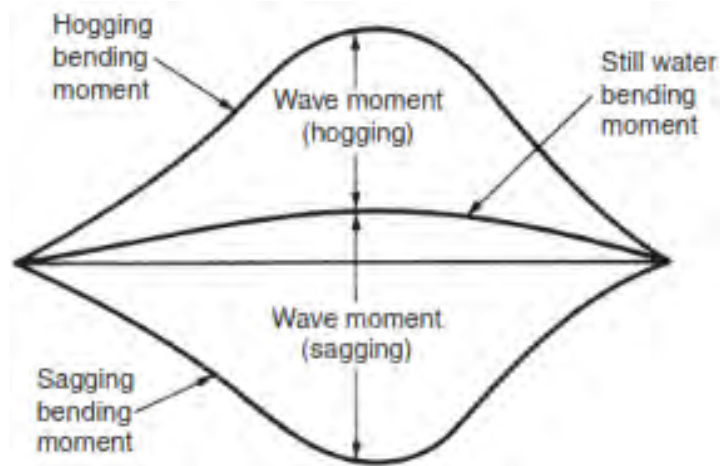
$M_w$  = *Momen bending* pada kondisi bergelombang

$M_\zeta$  = *Momen bending* yang dihasilkan oleh profil gelombang

$M_z$  = Momen bending yang dihasilkan oleh gerak *leaving*

$M_\psi$  = Momen bending yang dihasilkan oleh gerak *pitching*

Sedangkan untuk besarnya bending momen dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.15 di bawah ini:



**Gambar 2.15** Still water dan wave bending moment  
(Sumber: Eric Tupper, Introduction to Naval Architecture, 2002)

Bending momen akibat *heaving* pada *calm water* dirumuskan sebagai berikut:

$$M_z = \int \left[ \int \left( \frac{w'}{g} \omega_e^2 Z_a \right) dx + \int (2\rho g y(x) Z_a) dx \right] dx \dots\dots\dots (2.60)$$

Bending momen akibat *pitching* pada *calm water* dirumuskan sebagai berikut:

$$M_\psi = \int \left[ \int \left( \frac{w'}{g} \omega_e^2 \psi_a \right) dx + \int (2\rho g y(x) \psi_a) dx \right] dx \dots\dots\dots (2.61)$$

dengan :

$\frac{w'}{g}$  = added mass persatuan panjang kapal

$\omega_e$  = frekuensi *encountering*

$y(x)$  = *half-breadth* pada *waterplane* posisi x

$Z_a$  = amplitudo gerakan *heaving*

$\psi_a$  = amplitudo gerakan *pitching*

**2.2.23 Longitudinal Bending Moment Pada Regular Waves (Strip Theory)**

Solusi alternatif untuk menghitung bending momen statis pada gelombang trochoidal dengan memperhatikan gerakan kapal dapat dilakukan dengan Strip Theory oleh Korvin-Kroukovsky dan Jacobs. Beban total pada kapal di kondisi bergelombang diasumsikan sebagai berikut :

1. Pembebanan diakibatkan oleh distribusi uneven dari gaya berat dan *buoyancy* pada *calm water*  $df_a/dx$  diabaikan pada perhitungan. Karena hanya gaya dan momen dinamis saja yang diperhatikan. Momen statis tersebut harus ditambahkan secara terpisah pada bending momen dinamis agar dapat ditentukan bending momen totalnya.
2. Pembebanan diakibatkan perubahan distribusi *buoyancy* akibat profil gelombang dan juga karena gerakan *heaving* dan *pitching*.

$$\frac{df_b}{dx} = -c_n z_r \dots\dots\dots (2.62.1)$$

$$\frac{df_b}{dx} = -\rho g B_n (z - \xi\theta - \zeta) \dots\dots\dots (2.62.2)$$

dengan  $c_n = \rho g B_n \dots\dots\dots (2.62.3)$

3. Pembebanan akibat *Smith Effect*, yakni efek gradient tekanan pada gelombang.

$$\frac{df_c}{dx} = -c_n \zeta (1 - e^{-kz}) \dots\dots\dots (2.63.1)$$

$$\frac{df_c}{dx} = -\rho g B_n \zeta (1 - e^{-kz}) \dots\dots\dots (2.63.2)$$

4. Pembebanan akibat kecepatan air relatif terhadap gelombang dan gerakan kapal.

$$\frac{df_d}{dx} = -b_n w_r + u \frac{da_n}{d\xi} w_r \dots\dots\dots (2.64.1)$$

$$\frac{df_d}{dx} = \left( -b_n + u \frac{da_n}{d\xi} \right) (\dot{z} - \xi\dot{\theta} - u\theta - \dot{\zeta}e^{-kz}) \dots\dots\dots (2.64.2)$$

5. Pembebanan akibat gaya inersia dari massa kapal mm per satuan panjang *added mass*, dan efek inersia dari aliran air padagelombang. Gaya inersia memiliki arah yang berlawanan dengan percepatan dan sebanding dengan massa dikalikan dengan percepatan dengan tanda berlawanan, sehingga :

$$\frac{df_e}{dx} = -m_n \ddot{z}_n - a_n \dot{w}_r \dots\dots\dots (2.65.1)$$

$$\frac{df_e}{dx} = -m_n (\ddot{z} - \xi\ddot{\theta}) - a_n (\ddot{z} - \xi\ddot{\theta} + 2u\dot{\theta} - \ddot{\zeta}e^{-kz}) \dots\dots\dots (2.65.2)$$

Dengan  $a_n \ddot{\zeta} e^{-kz}$  merepresentasikan efek inersia dari aliran air pada gelombang yang terbentuk dari interferensi badan kapal – gelombang. Sehingga pembebanan dapat ditentukan dengan menjumlahkan semua gaya yang telah di uraikan diatas menjadi :

$$\sum_{i=a}^e \frac{df_i}{dx} = \frac{df}{dx} = m_n \ddot{z}_n + a_n \dot{w}_r + b_n w_r - u \frac{da_n}{d\xi} w_r + c_n z_r \dots (2.66)$$

dengan :

$$z_r = z - \xi \theta - \zeta e^{-kz} \dots (2.66.1)$$

$$w_r = \frac{dz_r}{dt} = \dot{z} - \xi \dot{\theta} - u \theta - \dot{\zeta} e^{-kz} \dots (2.66.2)$$

$$\dot{w}_r = \frac{dw_r}{dt} = \ddot{z} - \xi \ddot{\theta} + 2u \dot{\theta} - \dot{\zeta} e^{-kz} \dots (2.66.3)$$

$$\ddot{z}_n = \ddot{z} - \xi \ddot{\theta} \dots (2.66.4)$$

*Shear force* dinamis diperoleh dari integrasi beban yang terjadi pada :

$$f(x) = \int_0^x \frac{df}{dx}(x) dx \dots (2.67)$$

Dan bending momen dinamis vertikal merupakan integrasi dari *shear force*:

$$m(x) = \int_0^x f(x) dx \dots (2.68)$$

### 2.2.24 Beban Angkat Crane

Faktor yang mempengaruhi kapasitas *crane* dalam operasional yaitu

- Gaya angin
- Beban ayunan dan
- Kecepatan mengangkat

Faktor dinamis harus diperhatikan dengan hati-hati dalam perencanaan *crane* di atas FSO (Adi, 2005). Sesuai dengan batasan masalah yang digunakan, gerakan yang terjadi pada *crane* dan *boom* pada saat operasi serta defleksi dari *crane* diabaikan dan hanya ditinjau beban yang diangkat oleh *crane* saja. Drai beban angkat *crane* dicari gaya dan momen pada bagian sambungan *crane pedestal* dengan *hull* FSO.

Beban *crane* dicari dengan persamaan :

$$W = m x g \dots (2.69)$$

dengan

$W$  = Beban *crane* (N)

$m$  = massa dari beban (kg)

$g$  = percepatan gravitasi bumi ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

sedangkan persamaan untuk mencari momen adalah :

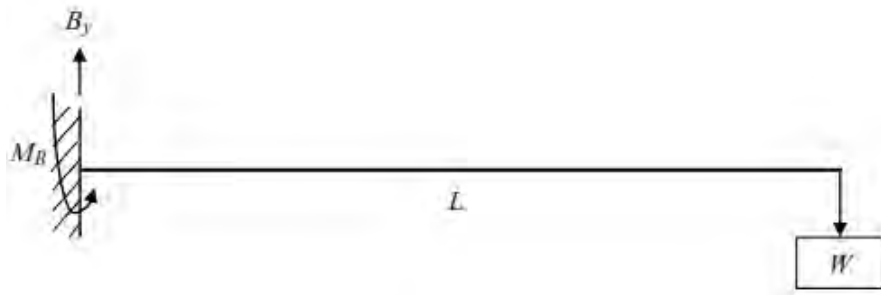
$$M = W \times l \quad \dots\dots\dots (2.70)$$

dengan

$M$  = momen (N.m)

$l$  = lengan (m)

Pada Gambar 2.16 di bawah ini merupakan ilustrasi *free body diagram crane*

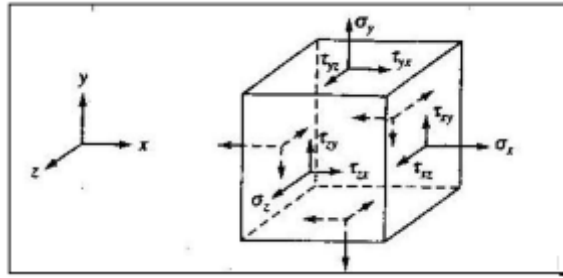


**Gambar 2.16** *Free Body diagram crane*  
(Sumber: Popov, 1996)

Frekuensi penggunaan *crane* dalam satu bulan adalah lebih dari 10 jam, tetapi tidak sampai dengan 50 jam (API, 2004), serta dalam satu kali operasi diasumsikan *crane* bekerja selama 10 menit.

### 2.2.25 Tegangan Yang Bekerja Pada *Crane*

Sebuah elemen dengan dimensi sangat kecil yang tersusun dari benda solid akan diuraikan secara umum tegangan tiga-dimensi. Tegangan yang terjadi seragam pada dan terdistribusi secara merata pada tiap permukaannya. Namun pada kenyataannya, tegangan yang terjadi hanya satu pada tiap permukaannya.



**Gambar 2.17** Tegangan tiga dimensi pada suatu elemen.  
 (Sumber: Ansel C. Ugural, Stresses in Plates and Shells, 1999)

Permukaan atau plane biasanya di identifikasikan berdasar pada sumbu normal ke permukaan tersebut. Sebagai contoh, permukaan x merupakan tegak lurus dari sumbu x. total kesembilan komponen saklar tegangan di identifikasikan sebagai tegangan titik, dapat digabungkan ke dalam bentuk:

$$[\tau_{ij}] = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.71)$$

Matriks diatas merepresentasikan variabel tegangan. Notasi *double subscript* menjelaskan : *subscript* pertama mendonasikan arah normal penampang dari komponen tegangan yang bekerja; *subscript* kedua mendonasikan arah tegangan. Dimana masing – masing notasi di uraikan sebagai berikut :

$$\sigma_x = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_v + 2G \epsilon_x \dots\dots\dots (2.72)$$

$$\sigma_y = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_v + 2G \epsilon_y \dots\dots\dots (2.73)$$

$$\sigma_z = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_v + 2G \epsilon_z \dots\dots\dots (2.74)$$

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} \dots\dots\dots (2.75)$$

$$\tau_{yz} = G \gamma_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yz} \dots\dots\dots (2.76)$$

$$\tau_{zx} = G \gamma_{zx} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{zx} \dots\dots\dots (2.77)$$



Dengan  $E$  adalah *Modulus Young*,  $\nu$  *Poisson Ratio*,  $G$  *Shear Modulus*, dan  $e_v$  *Volumetric Strain* yang mengekspresikan penjumlahan dari tiga komponen *strain* normal,  $e_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ . *Volumetric Strain* juga dapat dinotasikan sebagai  $e_v = \Delta V/V$ , dimana  $V$  adalah volume inisial (awal) dan  $\Delta V$  merupakan perubahan volume setelah mengalami deformasi.

### 2.2.26 Tegangan Axial

Tegangan aksial (tegangan normal) adalah intensitas gaya pada suatu titik yang tegak lurus terhadap penampang, yang didefinisikan sebagai:

$$\sigma = f = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \dots \dots \dots (2.78)$$

dengan:

F : gaya yang bekerja dalam arah tegak lurus terhadap penampang

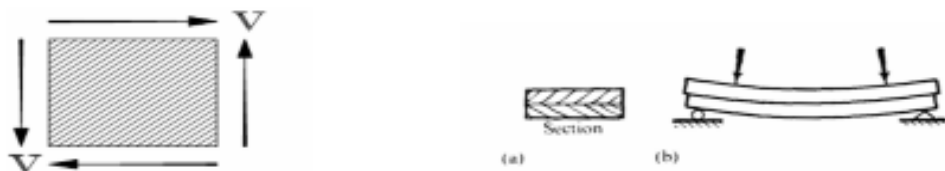
A : luas penampang

Pada batang-batang yang menahan gaya aksial saja, tegangan yang bekerja pada potongan yang tegak lurus terhadap sumbu batang adalah tegangan normal saja, tegangan geser tidak terjadi.

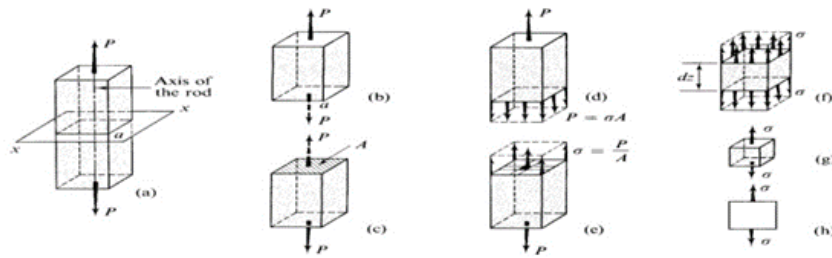
Arah potongan ini juga memberikan tegangan normal maksimum dibandingkan arah-arrah potongan lainnya. Apabila potongan dibuat cukup jauh dari ketidakteraturan (perubahan ukuran, sambungan), ternyata tegangan terdistribusi secara seragam, sehingga untuk memenuhi keseimbangan besarnya tegangan menjadi :

$$f = \frac{F}{A} \text{ atau } \frac{\text{gaya aksial}}{\text{luas}} \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \dots \dots \dots (2.79)$$

Pada Gambar 2.18 dan 2.19 di bawah ini diilustrasikan gaya geser dan tegangan normal yang terjadi balok



**Gambar 2.18** Gaya geser pada balok  
(Sumber: Popov 1996)



**Gambar 2.19** Ilustrasi tegangan normal akibat gaya aksial, (+) tarik dan (-) tekan  
(Sumber: Popov 1996)

### 2.2.27 Bending Stress

Momen luar diimbangi oleh momen dalam yang merupakan resultan tegangan lentur (*bending*).

$$M = \int_A f \cdot dA \cdot y = \int_A \left(-\frac{y}{c} f_{max}\right) dA \cdot y = -\frac{f_{max}}{c} \int_A y^2 dA \dots \dots \dots (2.80)$$

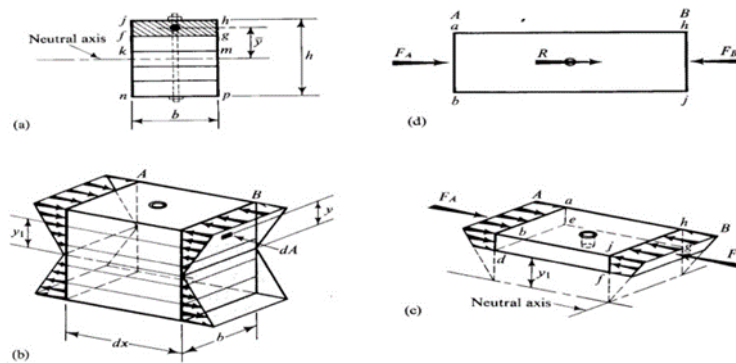
Integral  $\int_A y^2 dA = I$  adalah besaran penampang yang disebut momen *inersia* terhadap titik berat penampang. Jadi persamaan tegangan lentur menjadi:

$$M = -\frac{f_{max}}{c} I \text{ atau } f_{max} = -\frac{Mc}{I} \dots \dots \dots (2.81)$$

Tegangan lentur pada sembarang titik yang berjarak  $y$  dari garis netral :

$$f_{max} = -\frac{My}{I} \dots \dots \dots (2.82)$$

Gambar 2.20 di bawah ini menjelaskan tegangan lentur pada suatu penampang



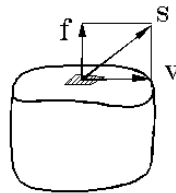
**Gambar 2.20** Tegangan lentur (*bending*) pada suatu penampang  
(Sumber: Popov 1996)

### 2.2.28 Tegangan Geser

Tegangan geser (*shear stress*) adalah intensitas gaya pada suatu titik yang sejajar terhadap penampang, yang didefinisikan sebagai:

$$\tau = v = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta A} \dots \dots \dots (2.83)$$

Dengan V adalah gaya yang bekerja dalam arah sejajar terhadap penampang dan A adalah luas penampang.



**Gambar 2.21** Gaya yang bekerja dalam arah sejajar terhadap penampang  
(Sumber: Popov, 1996)

Tidak sama dengan kasus tegangan aksial, kenyataannya tegangan geser yang bekerja sejajar terhadap penampang, diperoleh hubungan tegangan geser :

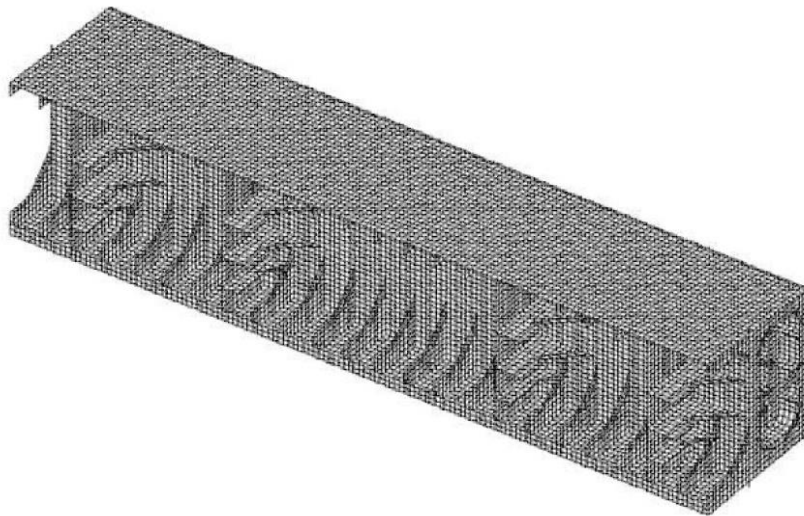
$$v = \frac{V}{A} \text{ atau } \frac{\text{gaya geser}}{\text{luas}} \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \dots \dots \dots (2.84)$$

### 2.2.29 Boundary Condition dan Meshing

*Boundary condition* atau kondisi batas sangatlah penting dalam proses analisis suatu struktur. *Boundary condition* sendiri dapat terbagi menjadi 3 bagian utama, yaitu *inertial*, *loads*, dan *supports*. *Boundary condition* tipe *inertial* diantaranya yaitu percepatan, *standard earth gravity*, dan kecepatan rotasi. Kemudian *Boundary condition* tipe *loads* diantaranya yaitu tekanan (*pressure*), gaya, momen, dan lain-lain. Sedangkan *boundary condition* tipe *support* diantaranya adalah *fixed supports*, *displacement*, dan lain-lain. *Boundary condition* sendiri dapat kita aplikasikan sesuai dengan analisis yang akan kita lakukan. Seperti contohnya pada sebuah geometri struktur, *boundary condition* dapat diterapkan pada struktur sebagai *body*, *face*, *edge*, maupun titik sesuai dengan kondisi analisis yang ingin kita lakukan.

Pembuatan *mesh* sangat diperhatikan ukuran *mesh* dan jenis *mesh* yang digunakan, semakin kecil ukuran *mesh* yang digunakan pada model, maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti, tetapi membutuhkan daya komputasi dan waktu yang lebih lama

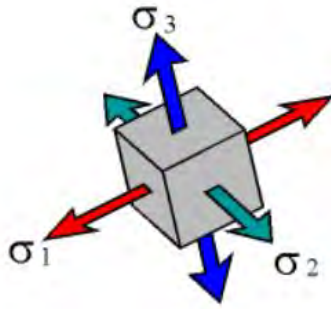
dibandingkan dengan *mesh* yang memiliki ukuran yang lebih besar. Oleh karena itu, besar ukuran *mesh* harus diatur sedemikian rupa sehingga diperoleh hasil yang teliti. Dalam BKI “*Guidelines for Floating Production Installations, 2013*” ukuran *mesh* telah diatur sesuai dengan elemen-elemen yang akan ditinjau, seperti *plate element*, *beam elements for stiffeners*, *truss elements for stiffeners*. Untuk elemen *stiffener*, ukuran *mesh* minimum yang dianjurkan sebesar 0,5 dari tebal *stiffener*. Contoh pembuatan *mesh* pada konstruksi kapal dapat dilihat pada Gambar 2.22 di bawah ini.



**Gambar 2.22** Pembuatan *mesh* pada konstruksi kapal

### **2.2.30 Tegangan Maksimum Utama**

Tegangan dapat ditransformasi dari suatu set sumbu koordinat ke set sumbu koordinat lainnya. Dengan transformasi pula dapat dicari set sumbu koordinat pada suatu titik yang memberikan tegangan utama dari kondisi tegangan yang telah diketahui di titik itu. Yang dimaksud tegangan utama ialah tegangan yang hanya memiliki nilai tidak nol untuk tegangan normal saja, sedangkan nilai tegangan gesernya nol. Ilustrasi tegangan maksimum utama dapat dilihat pada Gambar 2.23 berikut.



**Gambar 2.23** Tegangan Maksimum Utama (Sumber: ANSYS)

$\sigma_1$  – Maximum

$\sigma_2$  – Middle

$\sigma_3$  - Minimum

### 2.2.31 Metode Perhitungan Umur Kelelahan

Secara umum, terdapat 2 (dua) metode yang dapat digunakan untuk analisis kelelahan, yaitu pendekatan kurva S-N (*S-N curve approach*) yang dibuat berdasarkan tes kelelahan, dan pendekatan mekanika kepecahan (*fracture mechanics approach*). Untuk tujuan desain kelelahan, pendekatan kurva S-N lebih banyak digunakan dan dianggap sebagai metode yang paling cocok. Sedangkan metode mekanika kepecahan digunakan untuk menentukan ukuran cacat yang dapat diterima, menaksir perambatan retak kelelahan, merencanakan inspeksi dan strategi untuk memperbaikinya, dan lain-lain.

Analisa fatigue dengan metode S-N curve pada sambungan struktur dilakukan berdasarkan hukum kegagalan Palmgren-Miner (miner's rule). Menurut white dan ayyub (1996) miners's rule merupakan hipotesis kumulatif kerusakan berdasarkan konsep *strain energy*. Konsep *strain energy* menyatakan bahwa kerusakan terjadi ketika total *strain energy* pada siklus (n)

dari variable amplitudo pembebanan adalah sama dengan total dari siklus N dari konstan amplitudo pembebanan.

Menurut Paik dan Thayambali (2007) analisa fatigue dengan menggunakan pendekatan S-N curve dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu :

1. Mendefinisikan histogram siklik rentang tegangan
2. Memilih kurva S-N yang sesuai dengan karakteristik material
3. Menghitung kumulatif kerusakan fatigue (*cumulative fatigue damage*)

Metode pendekatan S-N curve mempunyai 4 metodologi dalam mengestimasi kumulatif kegagalan *fatigue (cumulative fatigue damage)* yaitu metode *deterministic*, metode *simplified fatigue assessment*, metode *spectral* dan metode *time domain fatigue*. Diantara keempat metode tersebut, metode yang paling banyak digunakan dalam berbagai rules klasifikasi terutama anggota IASC seperti ABS, GL, LR dan bahkan CSR adalah metode *simplified fatigue* dengan pendekatan empiris parameter distribusi weibull (Bai, 2003). Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk analisa fatigue adalah menggunakan metode S-N Curve dengan *Simplified Fatigue Analysis*. Untuk analisis kelelahan dengan menggunakan metode *simplified fatigue assessment* akan didapatkan hasil yang lebih akurat, karena adanya faktor parameter bentuk dari distribusi *Weibull* dalam *Simplified fatigue assessment*. Blagojevic (2010) menyebutkan bahwa untuk menghitung umur kelelahan dari struktur kapal, dibutuhkan *long-term stress distribution* dari struktur. Penelitian tentang beban gelombang yang mengenai badan kapal menunjukkan bahwa *long-term distribution of stress range* dapat direpresentasikan dengan parameter distribusi Weibull dan disebutkan bahwa pengaruh dari parameter bentuk Weibull ini sangat signifikan. Hasil dari penelitian menyebutkan bahwa dengan perubahan kecil dari parameter bentuk Weibull tersebut berpengaruh besar terhadap nilai *fatigue damage* yang dihasilkan.

### 2.2.32 Kurva S-N

Dasar dari kurva S-N atau *Wohler curve* adalah plot dari *stress* (S) dan *cycle* (N). Kurva S-N digunakan dalam karakteristik *fatigue* pada material yang mengalami pembebanan yang berulang pada magnitudo konstan (Ariduru, 2004). Secara umum persamaan dan kurva S-N dapat dilihat sebagai berikut (ABS) :

$$NS^m = A \text{ atau } \log(N) = \log(A) - m \log(S) \dots\dots\dots (2.85)$$

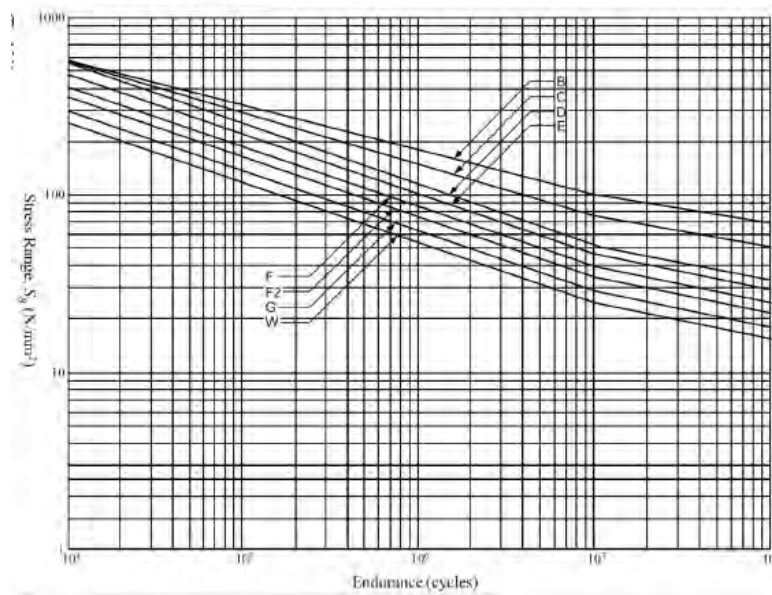
Dimana :

A = koefisien kekuatan kelelahan (*fatigue strength coefficient*)

m = kemiringan kurva S-N

S = rentang tegangan

Berikut pada Gambar 2.24 di bawah ini adalah kurva S-N



**Gambar 2.24** Kurva S-N

### 2.2.33 Penaksiran Umur Kelelahan Sederhana

Penaksiran ini menggunakan metode *simplified*, yang dinyatakan sebagai berikut (BKI):

$$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \dots\dots\dots (2.86)$$

$$\mu_i = \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{1 - \frac{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}} \dots\dots\dots (2.87)$$

$$v_i = \left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^\xi \ln N_R \dots\dots\dots (2.88)$$

$$N_L = \text{jumlah siklus untuk rencana umur desain} = \frac{f_0 U}{4 \log L}$$

$K_2$  = konstanta sesuai kurva S-N

$S_{Ri}$  = stress range (Mpa)

$S_q$  = stress range pada perpotongan 2 segmen pada kurva S-N

$m$  = slope

$\Delta m$  = perubahan slope pada segmen atas-bawah pada kurva S-N

$N_R = 10000$ , jumlah siklus

$\xi$  = parameter distribusi tegangan =  $1,4 - 0,2 \cdot \alpha \cdot L^{0,2}$

$\mu_i$  = koefisien tegangan

$\Gamma(x)$  = fungsi gamma

$U$  = design-life (detik)

$L$  = panjang struktur (m)

Selanjutnya, rasio *cumulative fatigue damage* ( $D$ ) dapat diubah ke dalam perhitungan umur kelelahan menggunakan persamaan di bawah ini

$$\text{fatigue life} = \frac{\text{design life}}{D} \dots\dots\dots (2.89)$$

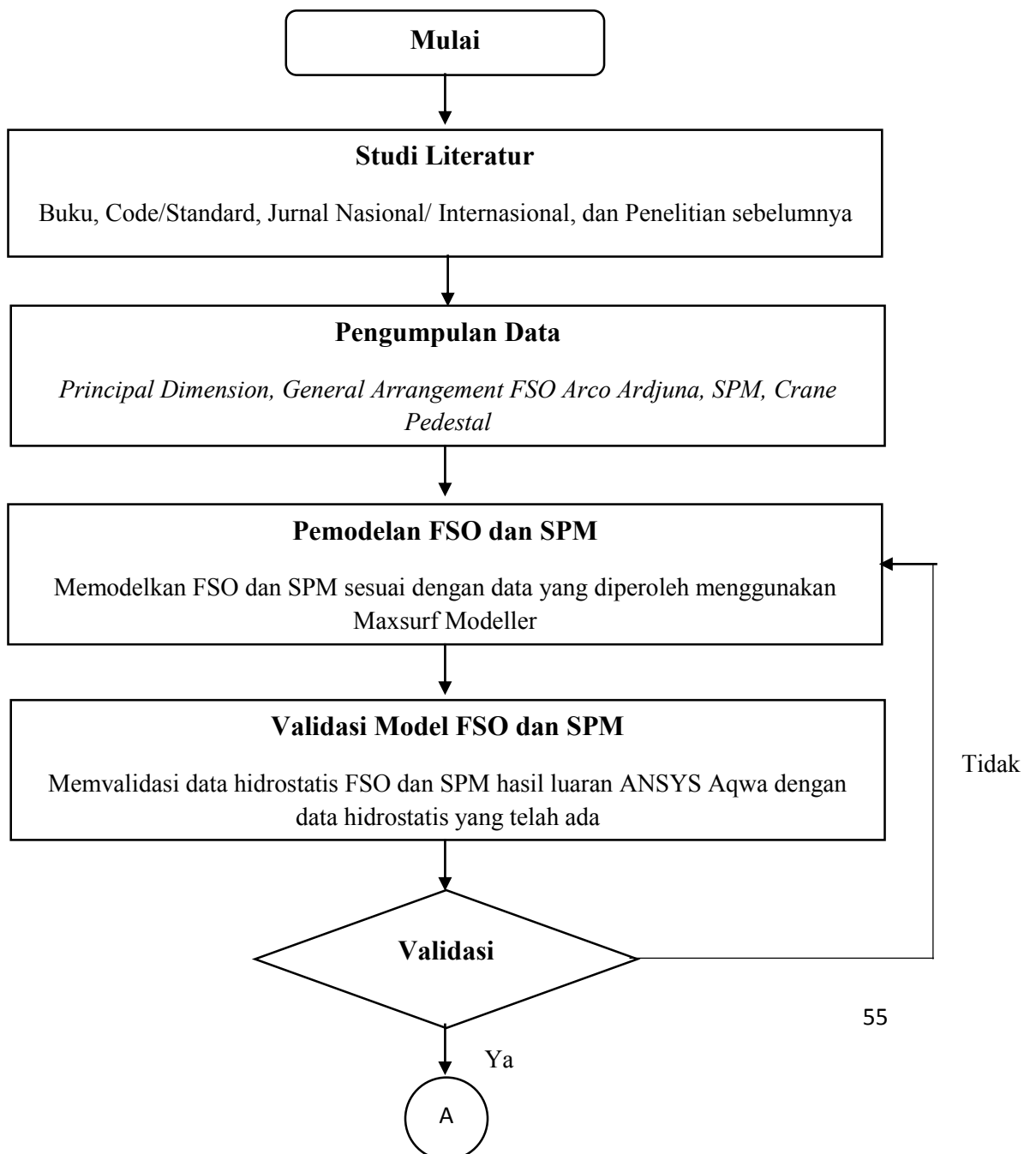


## BAB III

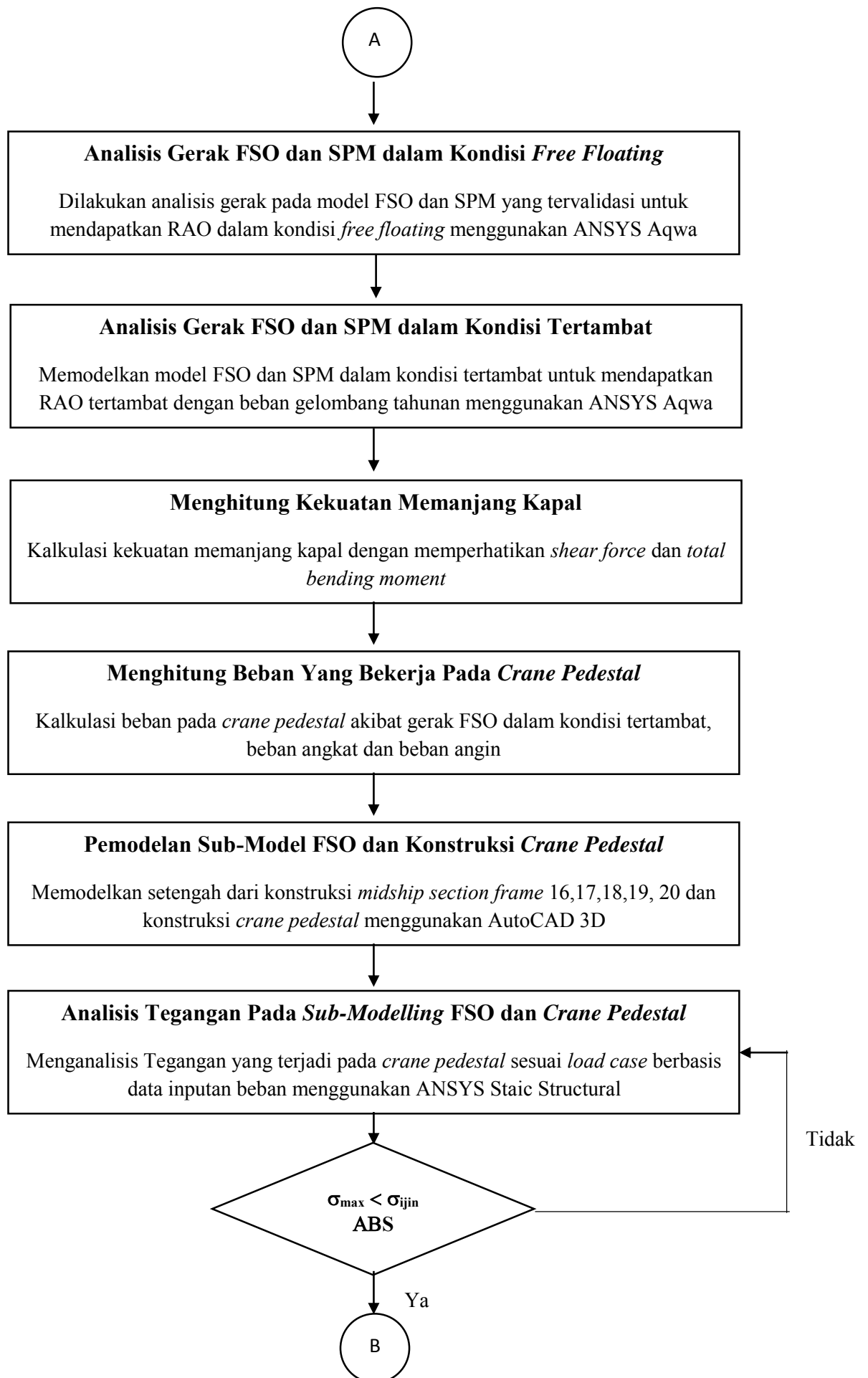
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir

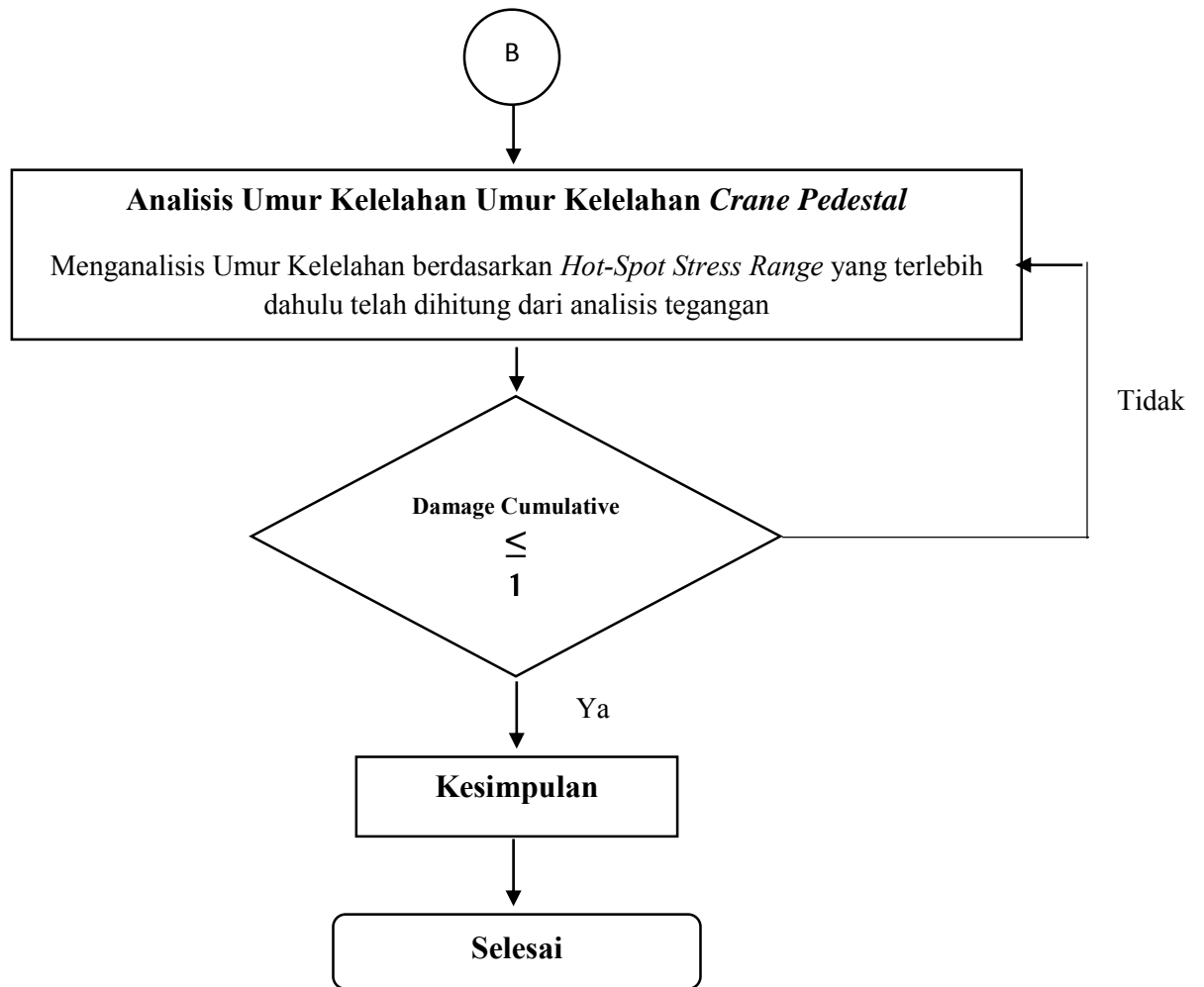
Dalam penelitian ini, metodologi penelitian yang digunakan adalah model numerik yang dibuat dengan bantuan *software*. Sedangkan untuk metodologi penelitiannya, secara umum dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) seperti pada Gambar 3.1 berikut:



**Gambar 3.1** Diagram Alir Metodologi Penelitian



**Gambar 3.1 (Lanjutan)** Diagram Alir Metodologi Penelitian



**Gambar 3.1 (Lanjutan)** Diagram Alir Metodologi Penelitian

### 3.2 Prosedur Penelitian

Sesuai Gambar 3.1, Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti tahapan – tahapan sebagai berikut:

#### 1. Studi Literatur

Pada tugas akhir ini mengambil bahan-bahan yang dibutuhkan sebagai studi literatur dari buku, materi perkuliahan, jurnal, dan juga mengacu dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang mempunyai keterkaitan pembahasan sebagai acuan dasar teori yang digunakan, selain itu juga pada penelitian ini mengacu pada *standart* maupun *code* yang relevan.

#### 2. Pengumpulan Data

Pengumpulan Data FSO Arco Ardjuna, SPM, data hidrostatis FSO Arco Ardjuna, *mooring line property* dan data lingkungan. Data FSO Arco Ardjuna, SPM, data hidrostatis FSO Arco Ardjuna, *mooring line property* dan data lingkungan didapatkan dari PT. Citra Mas.

#### 3. Pemodelan FSO dan SPM

Memodelkan ukuran dan model FSO dan SPM sesuai data yang diperoleh menggunakan Maxsurf Modeller.

#### 4. Validasi Model FSO dan SPM

Memvalidasi data hidrostatis FSO dan SPM hasil luaran ANSYS Aqwa dengan data hidrostatis yang telah ada untuk mengetahui tingkat kesalahan dalam pemodelan (*error*), dalam kasus ini tingkat error dibatasi untuk tidak melebihi 0,5% dari data hidrostatis yang telah ada.

#### 5. Analisis Gerak FSO dan SPM dalam Kondisi *Free Floating*

Menganalisis respon gerakan pada struktur FSO maupun struktur SPM (*Single Point Mooring*) untuk mengetahui karakteristik gerakan pada masing-masing struktur dalam kondisi terapung bebas dan juga didapatkan data RAO (*Response Amplitude Operator*) pada masing-masing struktur yang nantinya akan digunakan pada langkah selanjutnya.

#### 6. Analisis Gerak FSO dan SPM dalam Kondisi Tertambat

Memodelkan model FSO dan SPM dalam kondisi tertambat untuk mendapatkan RAO tertambat dengan beban gelombang tahunan menggunakan ANSYS Aqwa.

#### 7. Menghitung Kekuatan Memanjang Kapal

Dilakukan analisis kekuatan memanjang kapal pada saat tertambat. Kemudian dilakukan perhitungan *shear force* dan *total bending moment* pada FSO di *calm water*, *still water* dan akibat beban gelombang *sagging* dan *hogging* yang dipengaruhi karakteristik RAO FSO pada saat tertambat.

#### 8. Menghitung Beban Yang Bekerja Pada *Crane Pedestal*

Kalkulasi beban pada *crane pedestal* akibat gerak FSO dalam kondisi tertambat, beban angkat dan beban angin untuk mendefinisikan kombinasi pembebanan (*load case*) yang akan digunakan dalam analisis tegangan untuk menghitung *Hot-Spot Stress*.

#### 9. Pemodelan Sub-Model FSO dan Konstruksi *Crane Pedestal*

Memodelkan setengah dari konstruksi *midship section frame* 16,17,18,19, 20 dan konstruksi *crane pedestal* menggunakan AutoCAD 3D

#### 10. Analisis Tegangan Pada *Sub-Modelling* FSO dan *Crane Pedestal*

Menganalisis Tegangan yang terjadi pada *crane pedestal* sesuai banyak *load case* berbasis data inputan beban menggunakan ANSYS Staic Structural 16, yang sebelumnya telah terlebih dahulu dilakukan analisis *meshing sensitivity* untuk mendapatkan inputan ukuran *meshing* struktur yang cukup sensitif dalam mendefinisikan hasil luaran tegangan terhadap inputan beban yang dihitung. Setelah itu, dilakukan analisis tegangan terhadap masing – masing *load case* yang telah dihitung terlebih dahulu beban apa saja yang berpengaruh dan ditentukan kombinasi pembebanan dari beban – beban tersebut.

#### 11. Analisis Umur Kelelahan Umur Kelelahan *Crane Pedestal*

Menganalisis Umur Kelelahan berdasarkan *Hot-Spot Stress Range* yang terlebih dahulu telah dihitung berdasarkan *Hot-Spot Stress* dari hasil analisis tegangan. Langkah selanjutnya yaitu menganalisis umur kelelahan daripada konstruksi *Bow Crane Pedestal* dengan menggunakan kurva S-N berdasarkan hukum kegagalan

*Palmgren Miner* dengan mengestimasi kumulatif kegagalan *fatigue* menggunakan metode *simplified fatigue assessment*.

### 3.3 Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan meliputi data struktur dan data lingkungan. Data struktur terdiri dari *principle dimension* dan data hidrostatis FSO Arco Ardjuna, *main dimension* SPM, *property of anchor legs* dan *property mooring line* dapat dilihat pada Tabel 3.1 sampai Tabel 3.3 di bawah ini

- FSO Arco Ardjuna:

**Tabel 3.1** *Principle dimension* dan data hidrostatis FSO Arco Ardjuna

Designation	Units	Minimum Operating Draft	Maximum Operating Draft
Length, Loa	m	142.6	
Breadth, B	m	48.2	
Depth, D	m	26.5	
Displacement	tonne	15,529	153,202
Draft to Baseline	m	2.5	24
WSA	m <sup>2</sup>	6,681	12,813
Max. Cross sect. area	m <sup>2</sup>	114.34	1,150.63
Waterplane area	m <sup>2</sup>	6239	6,239
Cp		0.91	0.91
Cb		0.87	0.9
Cm		0.959	0.99
Cwp		0.91	0.91
LCB from zero pt.	m	-2.69	-2.78
LCF from zero pt.	m	-2.79	-2.79
KB	m	1.26	12.02
KMt	m	78	19.73
KMI	m	590.8	71.3

(Sumber: Pertamina PHE ONWJ)

- *Single Point Mooring:*

**Tabel 3.2** Main dimension CALM *buoy*

<b>Designation</b>	<b>Unit</b>	<b>Data</b>
<i>Shell Outer Diameter</i>	m	12
<i>Centre Well Diameter</i>	m	3.57
<i>Skirt Outer Diameter</i>	m	16.26
<i>Buoy Body Height</i>	m	5.3
<i>Skirt Height/ Baseline</i>	m	1
<i>Buoy Installed Draft</i>	m	2.38
<i>Centre of Gravity (KG)</i>	m	3.42
<i>Mass</i>	kg	255340
Kxx		7,63
Kyy		7,63
Kzz		10,61

(Sumber: Pertamina PHE ONWJ)

- *Anchor Legs*

**Tabel 3.3** Karakteristik *anchor legs*

<i>Number of Legs</i>	6
<i>Anchoring Pattern</i>	Even Spacing (60°)
<i>Paid out length</i>	350 m
<i>Pretension</i>	262.17 kN
<i>Pretension angle (w/horizontal)</i>	45.26°
<i>Number of segment</i>	1
<i>Chain diameter</i>	102 mm
<i>Chain type</i>	R3
<i>Minimum breaking load</i>	8315 kN
<i>Minimum breaking load after corrosion</i>	7051 kN
<i>Unit weight in Air</i>	210.16 kg/m
<i>Unit weight in Water</i>	182.72 kg/m
<i>Stiffness EA</i>	868 MN
<i>Anchoring radius</i>	302.57 m

(Sumber: Pertamina PHE ONWJ)

*(halaman ini sengaja di kosongkan)*



## BAB IV

### ANALISIS DAN HASIL

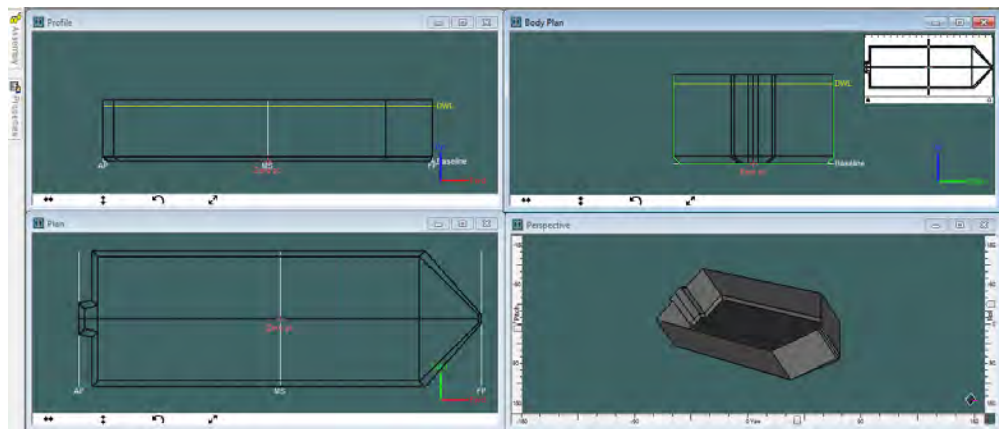
#### 4.1 Pemodelan

##### 4.1.1 Pemodelan FSO

FSO yang akan dilakukan pemodelan adalah FSO Arco Ardjuna PHE ONWJ. Permodelan FSO dibantu dengan penggunaan *software* Maxsurf V8i 20 – Advanced Modeller. Sebelum proses pembuatan model perlu diketahui parameter input penting, yakni data *principal dimension* Antara lain:

- L.O.A = 142.6 meter
- Breadth = 48.2 meter
- Height = 26.5 meter
- Draft at full load = 24 meter
- Draft at light ship = 2.5 meter

Selanjutnya adalah hasil pemodelan badan FSO dapat dilihat seperti pada Gambar 4.1



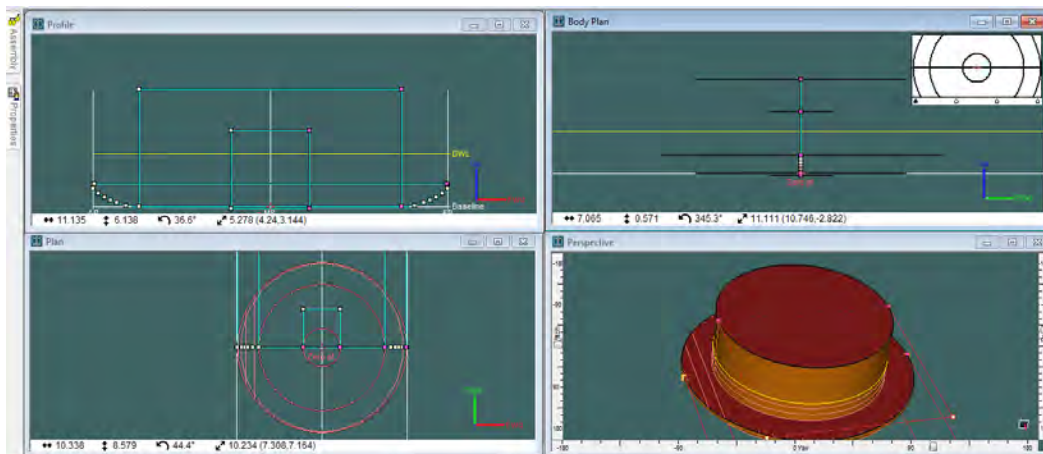
**Gambar 4.1** Pemodelan FSO Arco Ardjuna Menggunakan Maxsurf V8i 20  
Advanced Modeller

#### 4.1.2 Pemodelan SPM

SPM yang akan dilakukan pemodelan adalah SPM - SBM Arco Ardjuna PHE ONWJ. Permodelan FSO dibantu dengan penggunaan *software* Maxsurf V8i 20 – Advanced Modeller. Sebelum proses pembuatan model perlu diketahui parameter input penting, yakni data *principal dimension* Antara lain:

- *Shell Outer Diameter* = 12 meter
- *Centre Well Diameter* = 3.57 meter
- *Skirt Outer Diameter* = 16.26 meter
- *Buoy Body Height* = 5.3 meter
- *Skirt Height* = 1 meter
- *Buoy Installed Draft* = 2.38 meter
- *Centre of Gravity (KG)* = 3.42 meter

Selanjutnya adalah hasil pemodelan badan SPM dapat dilihat seperti pada Gambar 4.2



**Gambar 4.2** Pemodelan SPM - SBM Arco Ardjuna Menggunakan Maxsurf V8i 20 Advanced Modeller

## 4.2 Hidrostatik

Validasi model rancangan harus dilakukan dalam mendesain model analisis yang akurat. Validasi model dilakukan dengan membandingkan data hidrostatik hasil luaran software Maxsurf V8i 20 dengan data hidrostatik FSO yang sudah ada.

Besaran – besaran hidrostatik yang dibandingkan meliputi : Displacement, koefisien – koefisien bentuk, letak Centre of buoyancy, Wetted Surface Area dan lain – lainnya.

Dibawah ini akan ditampilkan data hidrostatik hasil luaran software Maxsurf V8i 20 – Advanced Modeller pemodelan FSO Arco Ardjuna untuk kondisi *light load* dan *full load* pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, serta validasi antara data hidrostatik hasil luaran Maxsurf dan data yang telah ada pada Tabel 4.3

**Tabel 4.1** Data hidrostatik hasil luaran *software* Maxsurf untuk model FSO Arco Ardjuna dalam kondisi *light load*

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	15096	t
2	Volume (displaced)	14727,658	m <sup>3</sup>
3	Draft Amidships	2,500	m
4	Immersed depth	2,500	m
5	WL Length	142,200	m
6	Beam max extents on WL	47,999	m
7	Wetted Area	6663,842	m <sup>2</sup>
8	Max sect. area	114,679	m <sup>2</sup>
9	Waterpl. Area	6202,484	m <sup>2</sup>
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,903	
11	Block coeff. (Cb)	0,863	
12	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,958	
13	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,909	
14	LCB length	-2,565	from zero
15	LCF length	-2,832	from zero
16	LCB %	-1,804	from zero
17	LCF %	-1,992	from zero
18	KB	1,301	m
19	KG fluid	13,440	m
20	BMt	76,907	m
21	BML	595,922	m
22	GMt corrected	64,768	m
23	GML	583,782	m
24	KMt	78,208	m
25	KML	597,222	m
26	Immersion (TPc)	63,575	tonne/cm
27	MTc	619,739	tonne.m
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(	17063,648	tonne.m
29	Length:Beam ratio	2,963	
30	Beam:Draft ratio	19,200	
31	Lenoth:Vol <sup>0.333</sup> ratio	5,801	

**Tabel 4.2** Data hidrostatik hasil luaran *software* Maxsurf untuk model FSO Arco Ardjuna dalam kondisi *full load*

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	147855	t
2	Volume (displaced)	144248,460	m <sup>3</sup>
3	Draft Amidships	24,000	m
4	Immersed depth	24,000	m
5	WL Length	142,200	m
6	Beam max extents on WL	47,556	m
7	Wetted Area	13219,108	m <sup>2</sup>
8	Max sect. area	1119,969	m <sup>2</sup>
9	Waterpl. Area	6136,148	m <sup>2</sup>
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,906	
11	Block coeff. (Cb)	0,889	
12	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,981	
13	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,907	
14	LCB length	-2,681	from zero
15	LCF length	-2,734	from zero
16	LCB %	-1,886	from zero
17	LCF %	-1,923	from zero
18	KB	12,124	m
19	KG fluid	13,440	m
20	BMt	7,591	m
21	BML	60,250	m
22	GMt corrected	6,275	m
23	GML	58,933	m
24	KMt	19,715	m
25	KML	72,373	m
26	Immersion (TPc)	62,896	tonne/cm
27	MTc	612,769	tonne.m
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(	16191,068	tonne.m
29	Length:Beam ratio	2,990	
30	Beam:Draft ratio	1,982	
31	Lenoth:Vol <sup>0.333</sup> ratio	2,711	

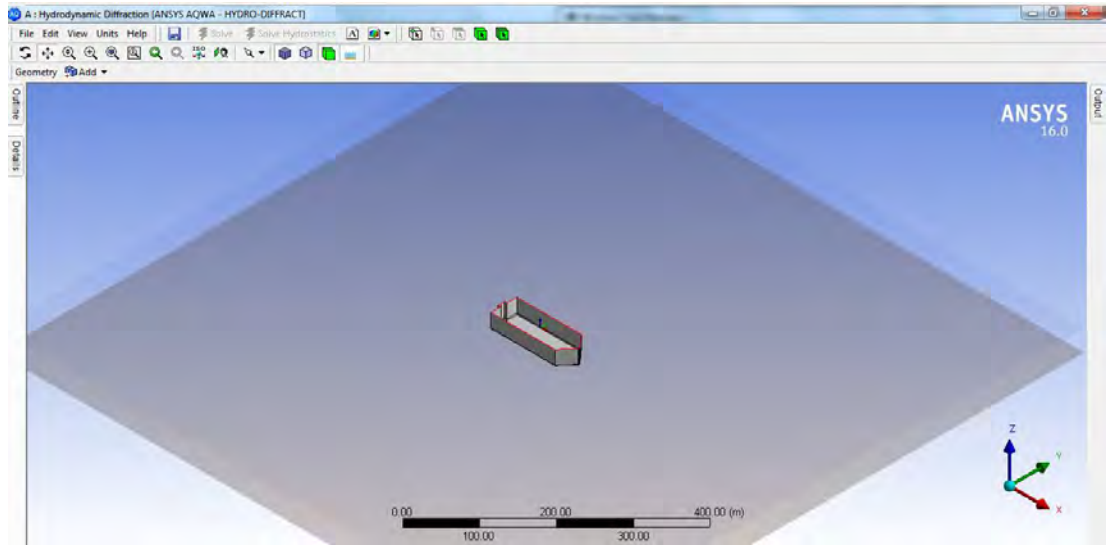
**Tabel 4.3** Koreksi Hidrostatik Antara data hasil luaran Maxsurf dengan data yang sudah ada dalam kondisi *light* dan *full load*

	UNIT	LIGHT				FULL			
		Data	Model	Error	Persentase	Data	Model	Error	Persentase
Displacement	tonne	15385	15096	2,9149	1,87845%	153026	147855	5,0333	3,379164%
Volume	m <sup>3</sup>	15009,76	14727,66	2,8210	1,87943%	149293,7	144248,5	5,0338	3,379379%
Draft to Baseline	m	2,5	2,5	0,0000	0,00000%	24	24	0,0000	0,00000%
Immersed depth	m	2,5	2,5	0,0000	0,00000%	24	24	0,0000	0,00000%
Lwl	m	142,6	142,2	0,4000	0,28050%	142,6	142,2	0,4000	0,280505%
Beam Lwl	m	48,2	47,999	0,2004	0,41701%	48,2	47,556	0,6434	1,336100%
WSA	m <sup>2</sup>	6681	6663,842	17,158	0,25682%	12813	13219,11	-4,0317	-3,169500%
Max. Cross sect. area	m <sup>2</sup>	114,34	114,679	-0,339	-0,29648%	1150,63	1119,969	0,0266	2,664714%
Waterplane area	m <sup>2</sup>	6239	6202,484	36,516	0,58529%	6239	6136,148	102,852	1,648533%
Cp		0,91	0,903	0,007	0,76923%	0,908	0,906	0,002	0,220264%
Cb		0,873	0,863	0,010	1,14548%	0,904	0,889	0,015	1,659292%
Cm		0,959	0,958	0,001	0,10428%	0,996	0,981	0,015	1,506024%
Cwp		0,908	0,909	-0,001	-0,11013%	0,908	0,907	0,001	0,110132%
LCB from midship	m	-2,69	-2,565	-0,125	4,64684%	-2,78	-2,681	-0,099	3,561151%
LCF from midship	m	-2,79	-2,832	0,043	-1,50538%	-2,79	-2,734	0,056	2,007168%
KB	m	1,26	1,301	-0,041	-3,25397%	12,02	12,124	-0,104	-0,865225%
KMt	m	78	78,208	-0,208	-0,26667%	19,73	19,715	0,0008	0,076026%
KML	m	590,8	597,222	-6,422	-1,08700%	71,3	72,373	-1,073	-1,504909%

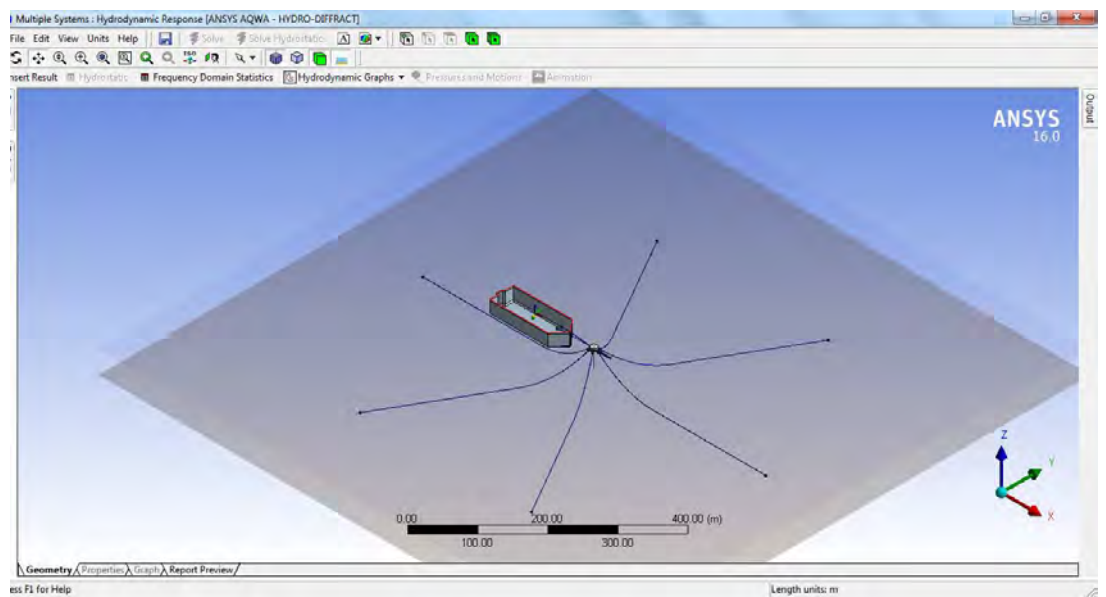
### 4.3 Analisis Gerakan FSO

Analisis gerakan FSO dalam kondisi *free floating* maupun tertambat pada *single point mooring system* dilakukan dengan penggunaan *software* ANSYS Workbench 16.0 – AQWA. Analisis dilakukan dengan menginputkan data geometri hasil luaran *software* Maxsurf V8i 20 – Advanced Modeller dan data – data lingkungan yang telah dikumpulkan sebelumnya.

FSO Arco Ardjuna PHE ONWJ terletak di perairan Jawa Barat dengan kedalaman rata – rata 40 meter serta Hsignifikan gelombang 1.6 meter. Spektrum gelombang yang digunakan dalam analisis gerakan adalah JONSWAP karena diasumsikan bahwa perairan Indonesia adalah sama persis seperti perairan tertutup dimana spektrum gelombang JONSWAP digunakan. Berikut pada Gambar 4.3 dan 4.4 dibawah ini adalah dua pemodelan analisis gerakan FSO dalam kondisi *free floating* maupun tertambat pada *single point mooring system* yang dilakukan dengan penggunaan *software* ANSYS Workbench 16.0 – AQWA



**Gambar 4.3** Pemodelan FSO Arco Ardjuna dalam kondisi *free floating* menggunakan software ANSYS Workbench 16.0 – AQWA

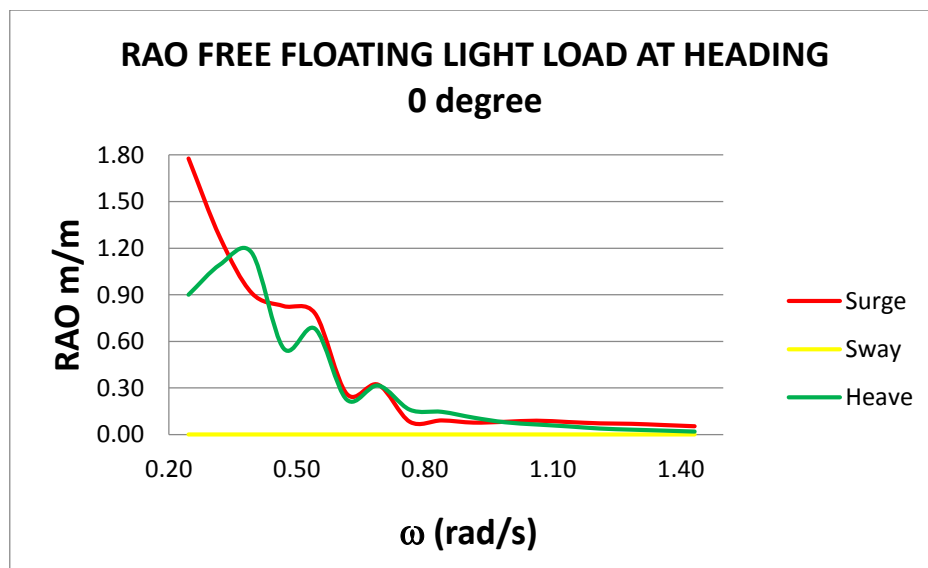


**Gambar 4.4** Pemodelan FSO Arco Ardjuna dalam kondisi tertambat menggunakan software ANSYS Workbench 16.0 – AQWA

#### 4.4 Response Amplitude Operator (RAO)

RAO FSO dalam kondisi *free floating* maupun tertambat pada *single point mooring system* yang dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS Workbench 16.0 – AQWA (Hydrodynamic diffraction and response). RAO gerakan dari FSO Arco Ardjuna ditinjau dalam 2 asumsi muatan yaitu light load dan full load, serta beberapa variasi heading gelombang terhadap badan FSO yaitu heading 0, 90, dan 180 derajat. Masing – masing RAO dari beberapa arah pembebanan gelombang tersebut menghasilkan 2 jenis RAO yaitu RAO translasional yang meliputi gerakan *surge*, *sway* dan *heave* serta RAO rotasional yang meliputi gerakan *roll*, *pitch* dan *yaw*.

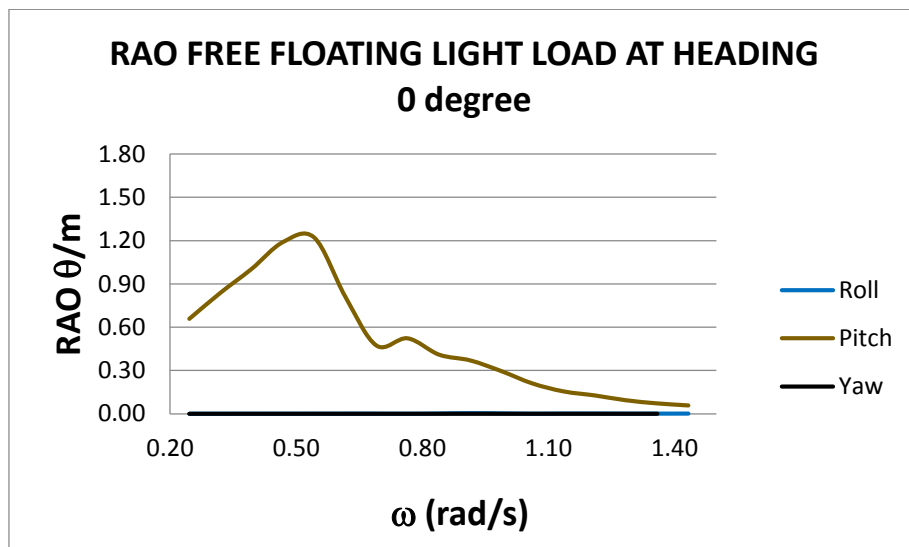
Berikut adalah RAO *free floating* dan tertambat hasil perhitungan menggunakan ANSYS 16.0 – AQWA (Hydrodynamic diffraction and response) pada beberapa jenis variasi pembebanan dan muatan tersaji pada Gambar 4.5 hingga 4.28 di bawah ini.



**Gambar 4.5** Grafik RAO Translasi FSO *Free Floating* 0 derajat kondisi *light load*

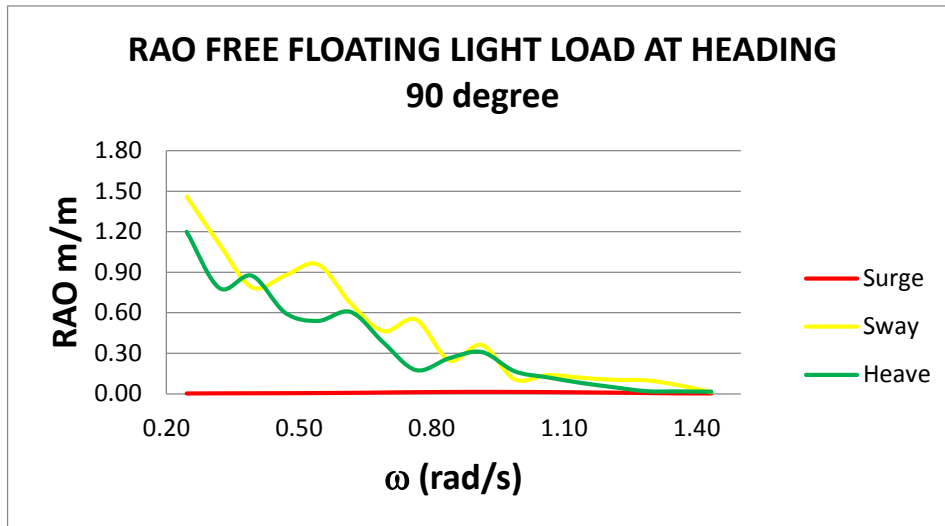
Pada Gambar 4.5 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan kosong dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang

0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 0 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *surge* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *surge* sebesar 1,8 m/m dan *heave* sebesar 1,2 m/m pada kondisi muatan FSO kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



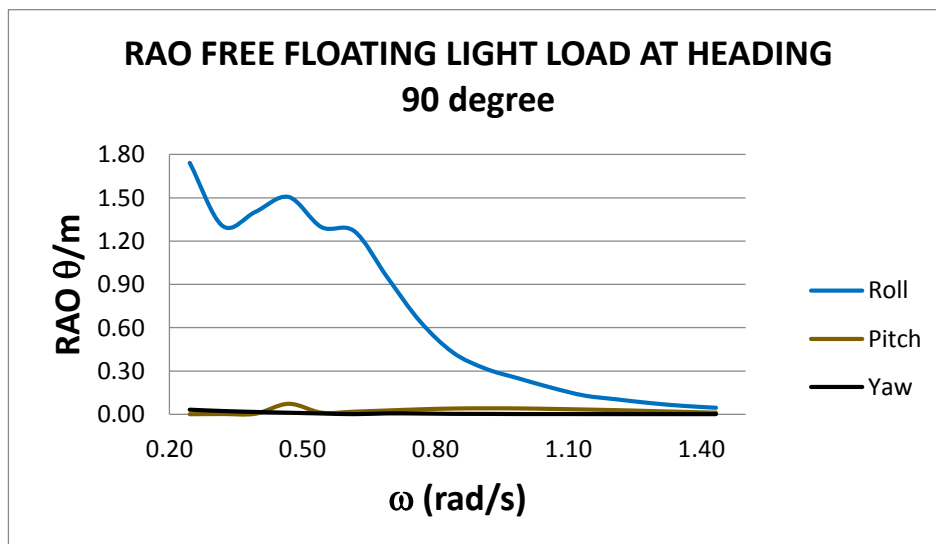
**Gambar 4.6** Grafik RAO Rotasi FSO *Free Floating* 0 derajat kondisi *light load*

Pada Gambar 4.6 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan kosong dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 0 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *pitch* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *pitch* sebesar 1,25 derajat/m pada kondisi muatan FSO kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,7 rad/s. Dari Gambar 4.5 dan 4.6 dapat menunjukkan bahwa arah datang gelombang akan menentukan gerakan dominan yang selaras dengan sumbu datang gelombang secara translasi maupun rotasi.



**Gambar 4.7** Grafik RAO Translasi FSO *Free Floating* 90 derajat kondisi *light load*

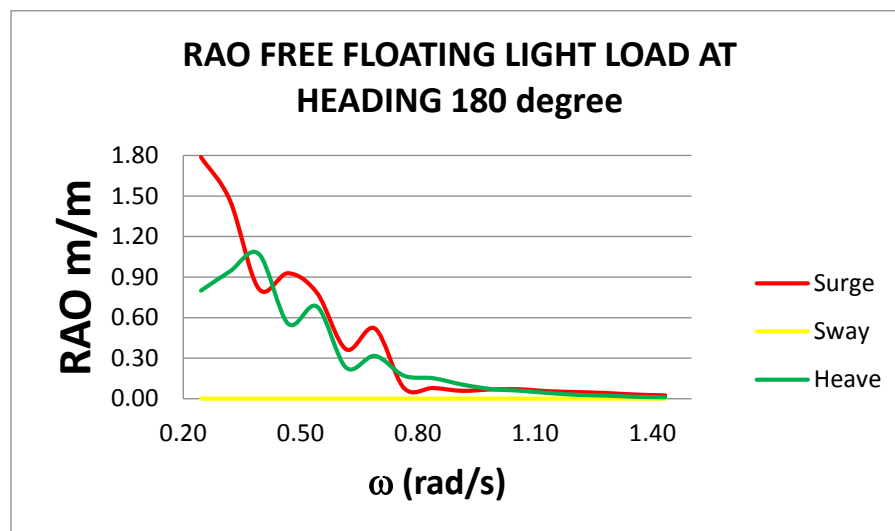
Pada Gambar 4.7 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan kosong dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 90 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *sway* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *sway* sebesar 1,5 m/m dan *heave* sebesar 1,2 m/m pada kondisi muatan FSO kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



**Gambar 4.8** Grafik RAO Rotasi FSO *Free Floating* 90 derajat kondisi *light loa*

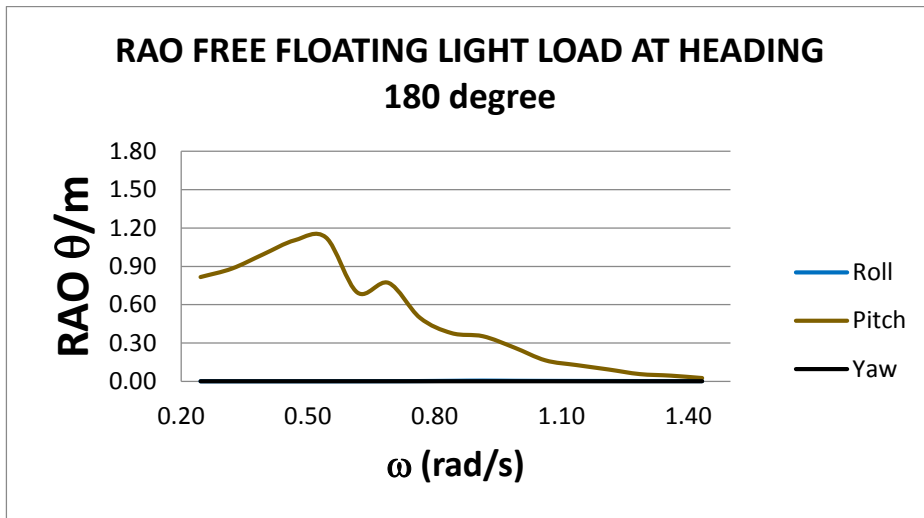


Pada Gambar 4.8 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan kosong dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 90 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *roll* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *roll* sebesar 1,8 derajat/m pada kondisi muatan FSO kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,7 rad/s. Dari Gambar 4.7 dan 4.8 dapat menunjukkan bahwa arah datang gelombang 90 derajat terhadap FSO akan menentukan akan sangat mempengaruhi gerakan pada sumbu y secara translasi yaitu *yaw* serta gerakan rotasi pada sumbu x sebagai porosnya yaitu *roll*..



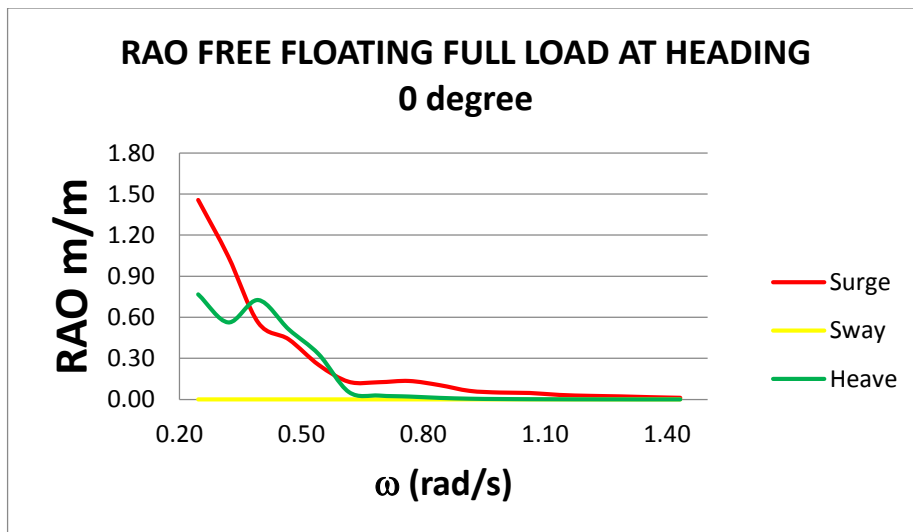
**Gambar 4.9** Grafik RAO Translasi FSO *Free Floating* 180 derajat kondisi *light load*

Pada Gambar 4.9 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan kosong dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 180 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *surge* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *surge* sebesar 1,8 m/m dan *heave* sebesar 1,1 m/m pada kondisi muatan FSO kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



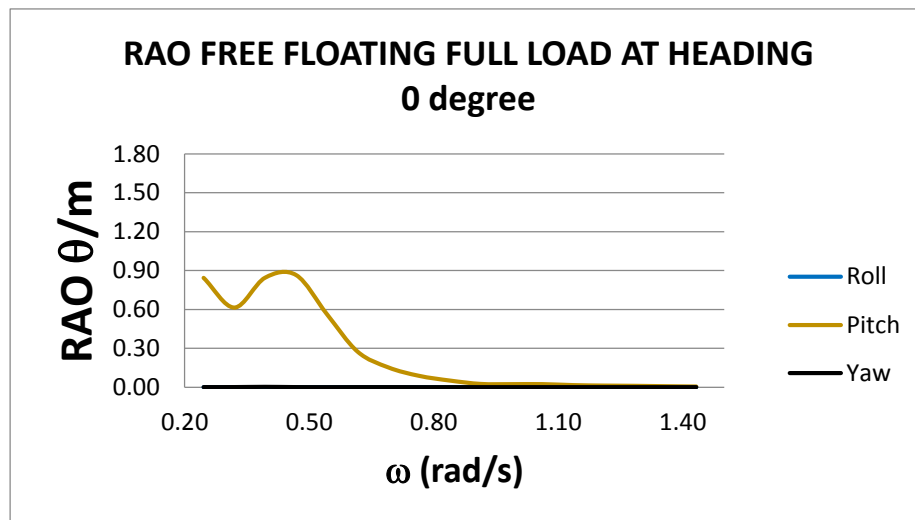
Gambar 4.10 Grafik RAO Rotasi FSO *Free Floating* 180 derajat kondisi *light load*

Pada Gambar 4.10 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan kosong dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 180 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *pitch* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *pitch* sebesar 1,1 derajat/m kondisi muatan kosong.



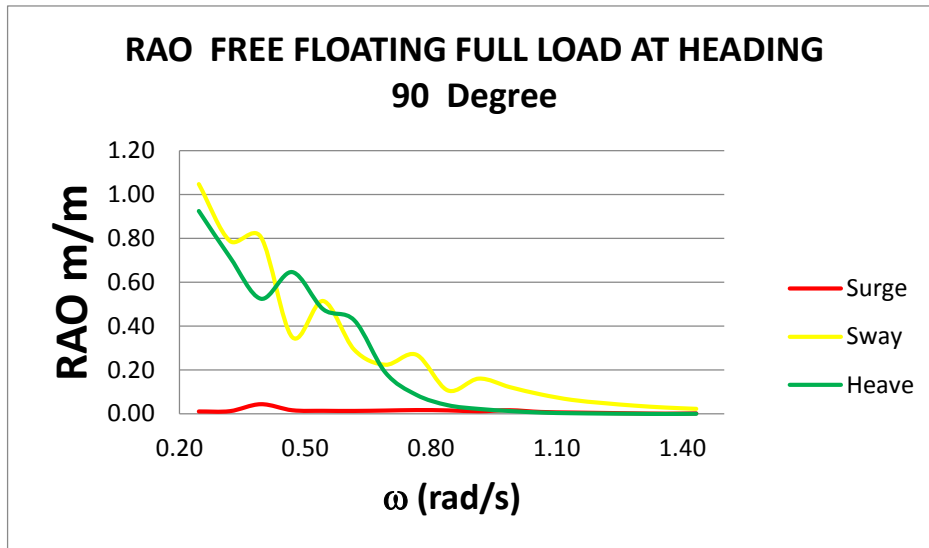
Gambar 4.11 Grafik RAO Translasi FSO *Free Floating* 0 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.11 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan penuh dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 0 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *surge* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *surge* sebesar 1,5 m/m dan *heave* sebesar 0,8 m/m pada kondisi muatan FSO penuh serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



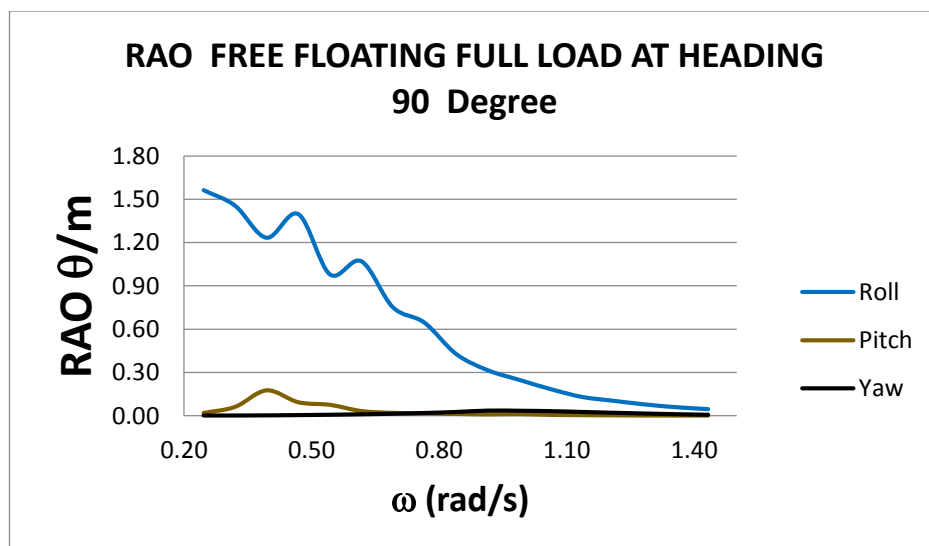
**Gambar 4.12** Grafik RAO Rotasi FSO *Free Floating* 0 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.12 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan penuh dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 0 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *pitch* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *pitch* sebesar 0,9 derajat/m kondisi muatan kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s. Demikian juga dapat diamati bahwa dalam kondisi muatan penuh ini RAO yang terjadi dengan heading gelombang 0 derajat yang sama dengan kondisi muatan penuh cenderung lebih kecil besarnya.



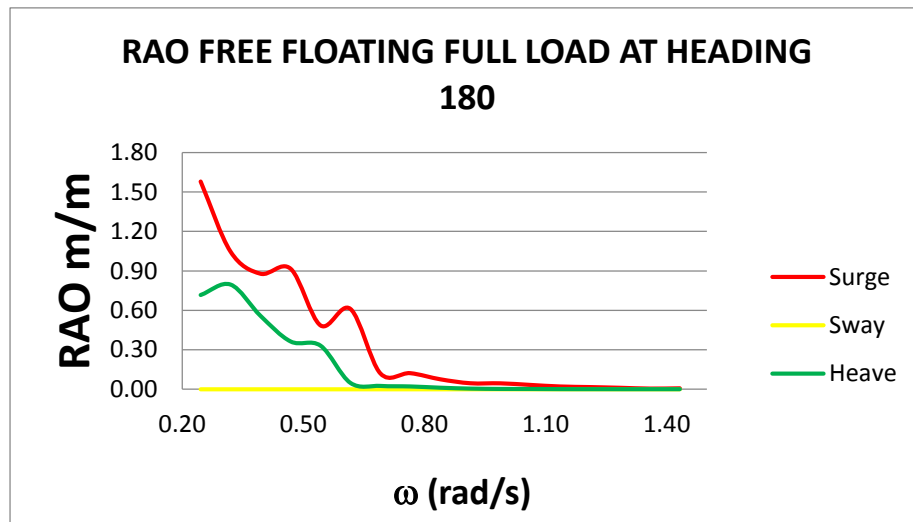
Gambar 4.13 Grafik RAO Translasi FSO *Free Floating* 90 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.13 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan penuh dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 90 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *sway* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *sway* sebesar 1,05 m/m dan *heave* sebesar 0,9 m/m pada kondisi muatan FSO penuh.



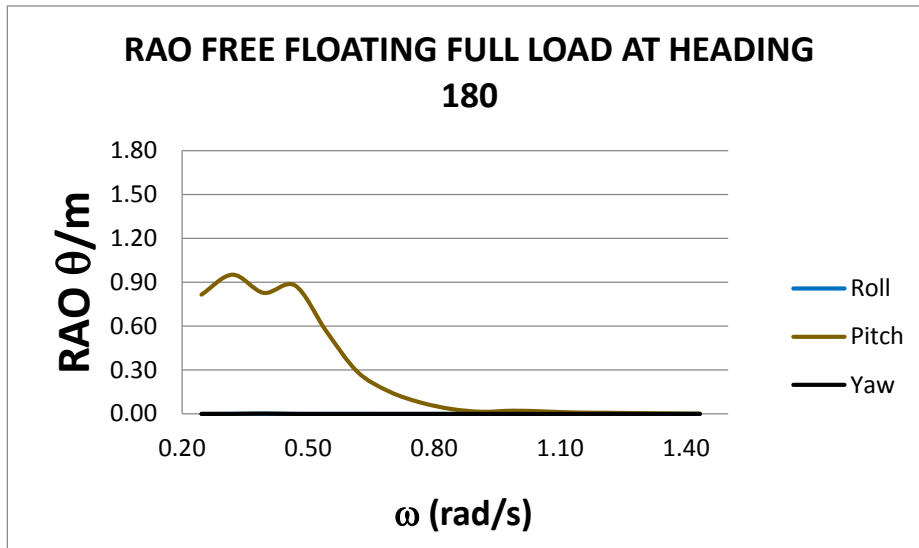
Gambar 4.14 Grafik RAO Rotasi FSO *Free Floating* 90 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.14 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan penuh dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 90 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *roll* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *roll* sebesar 1,5 m/m pada kondisi muatan FSO penuh serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



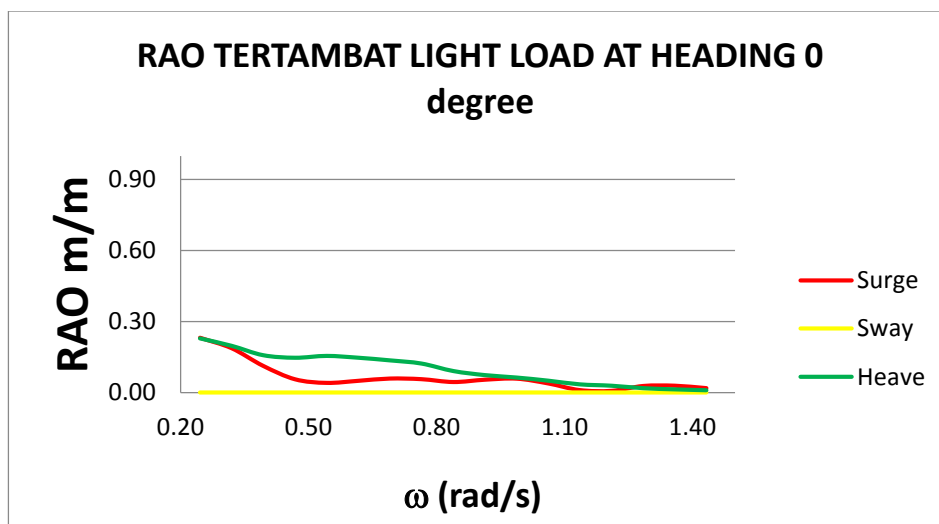
Gambar 4.15 Grafik RAO Translasi FSO *Free Floating* 180 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.15 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan penuh dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 180 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *surge* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *surge* sebesar 1,6 m/m dan *heave* sebesar 0,8 m/m pada kondisi muatan FSO penuh serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



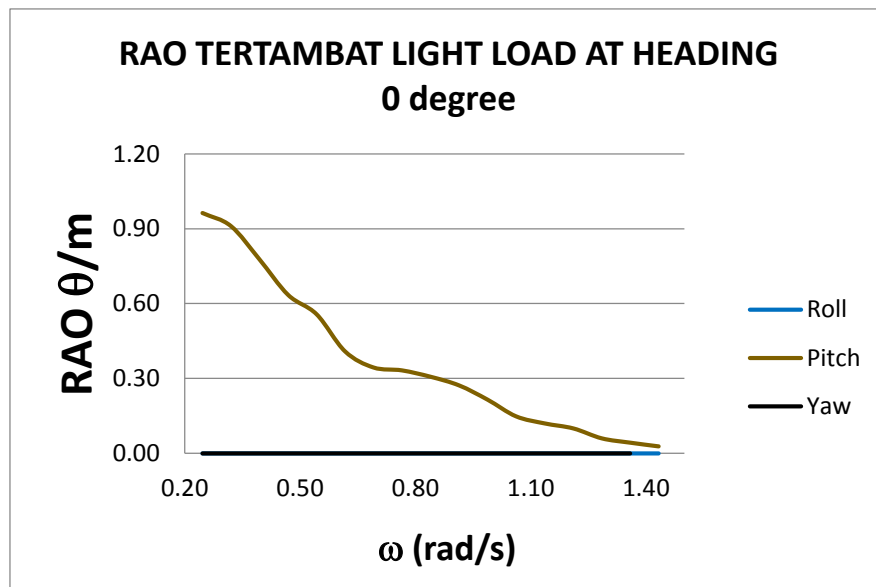
Gambar 4.16 Grafik RAO Rotasi FSO *Free Floating* 180 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.16 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan penuh dalam kondisi mengapung bebas dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 180 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *pitch* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *pitch* sebesar 0,9 derajat/m kondisi muatan penuh serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



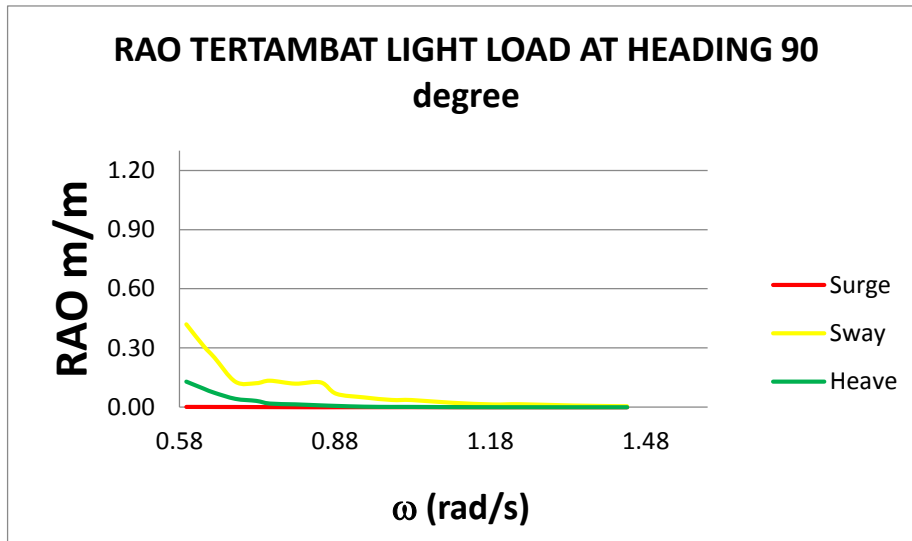
Gambar 4.17 Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 0 derajat kondisi *light load*

Pada Gambar 4.17 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan kosong dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 0 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *surge* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *surge* sebesar 0,28 m/m dan *heave* sebesar 0,29 m/m pada kondisi muatan FSO kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



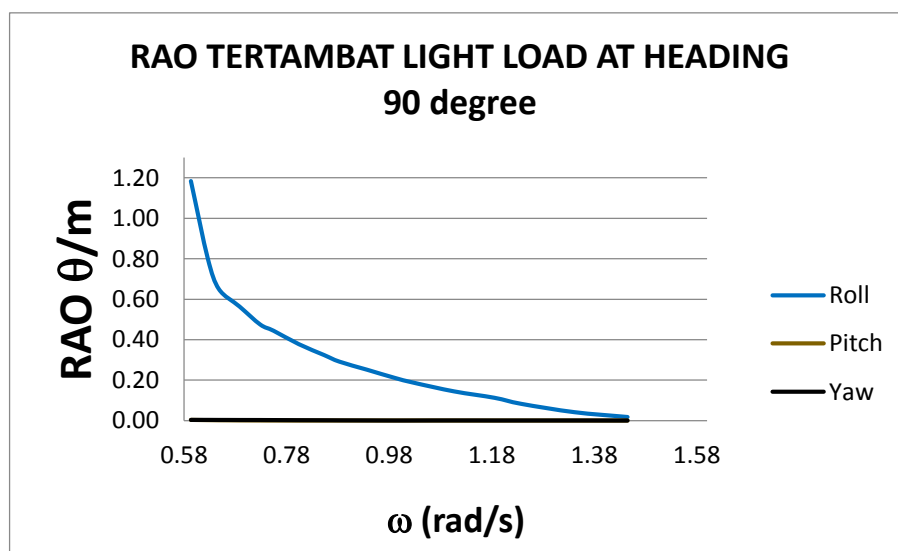
**Gambar 4.18** Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 0 derajat kondisi *light load*

Pada Gambar 4.18 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan penuh dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 0 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *pitch* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *pitch* sebesar 1 derajat/m kondisi muatan kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



**Gambar 4.19** Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 90 derajat kondisi *light load*

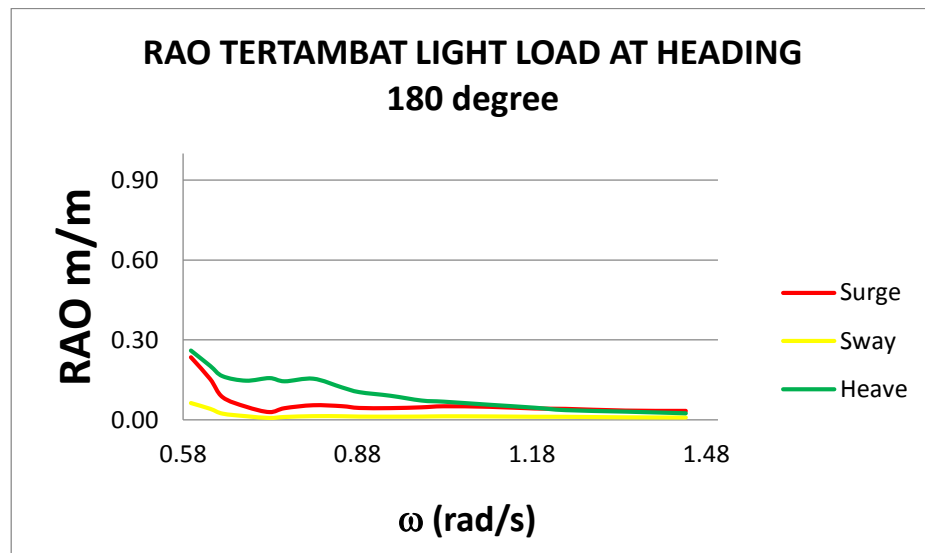
Pada Gambar 4.19 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan kosong dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 90 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *sway* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *sway* sebesar 0,5 m/m dan *heave* sebesar 0,15 m/m pada kondisi muatan FSO kosong.



**Gambar 4.20** Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 90 derajat kondisi *light load*

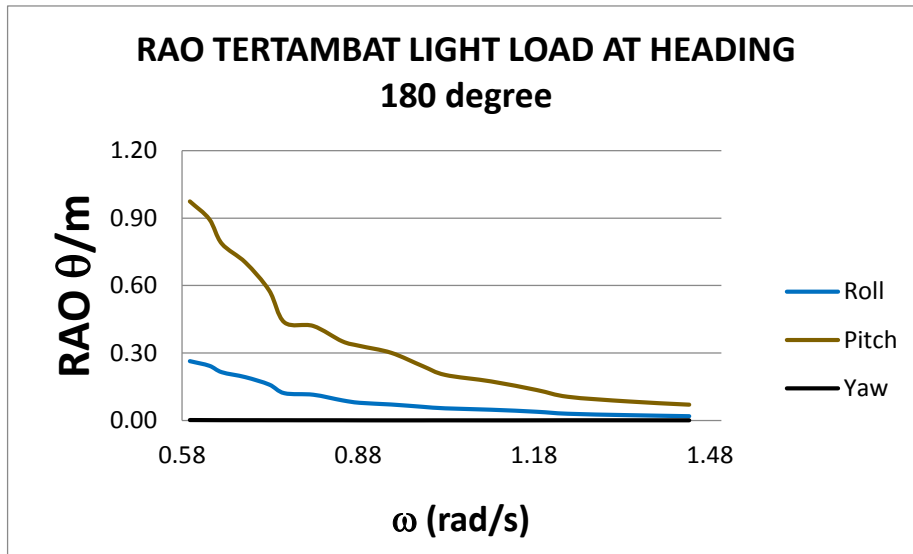


Pada Gambar 4.20 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan kosong dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 90 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *roll* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *roll* sebesar 1,2 derajat/m.



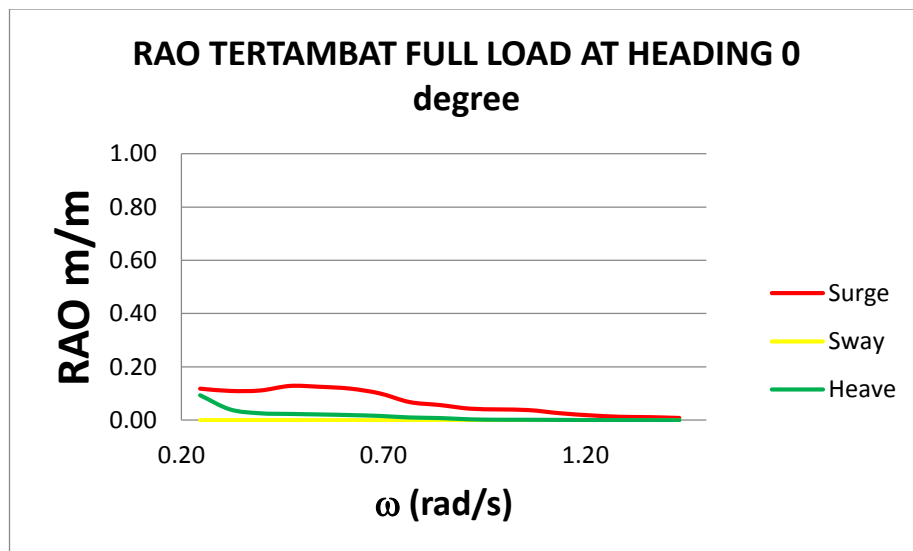
**Gambar 4.21** Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 180 derajat kondisi *light load*

Pada Gambar 4.21 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan kosong dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 180 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *surge* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *surge* sebesar 0,28 m/m dan *heave* sebesar 0,29 m/m pada kondisi muatan FSO kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



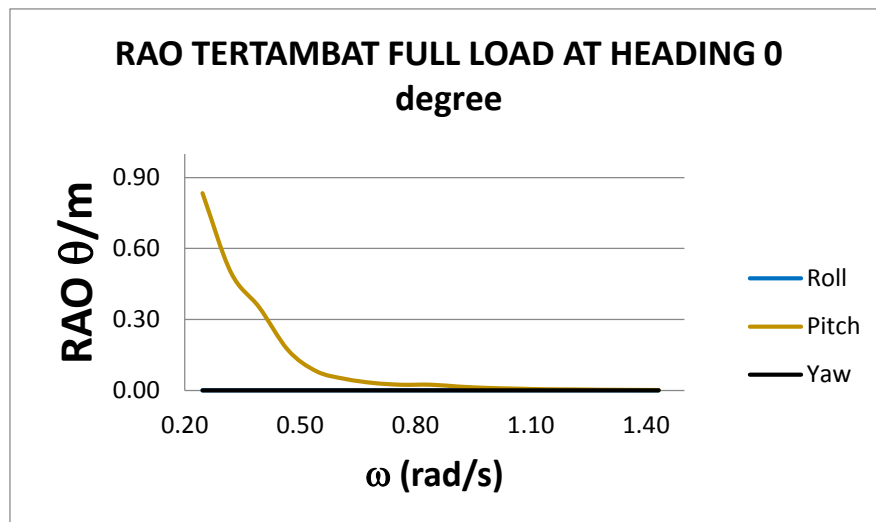
**Gambar 4.22** Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 180 derajat kondisi *light load*

Pada Gambar 4.22 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan penuh dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 180 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *pitch* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *pitch* sebesar 1 derajat/m kondisi muatan kosong.



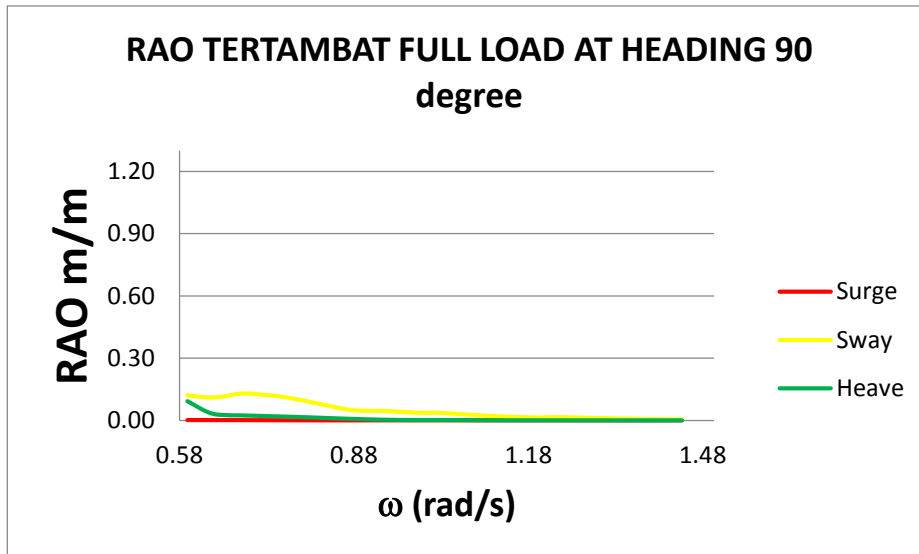
**Gambar 4.23** Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 0 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.23 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan penuh dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 0 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *surge* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *surge* sebesar 0,28 m/m dan *heave* sebesar 0,29 m/m pada kondisi muatan FSO kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



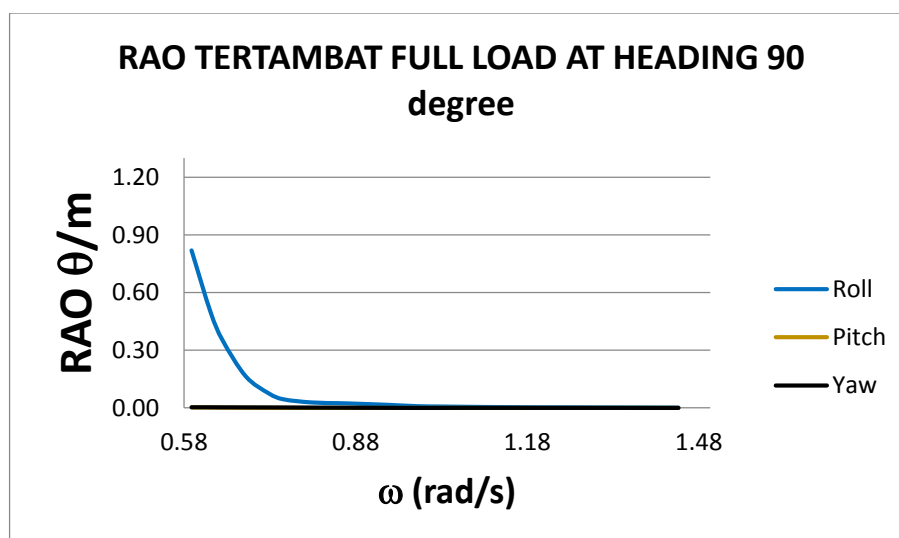
**Gambar 4.24** Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 0 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.24 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan penuh dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 0 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *pitch* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *pitchl* sebesar 0,88 derajat/m kondisi muatan penuh serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,5 rad/s.



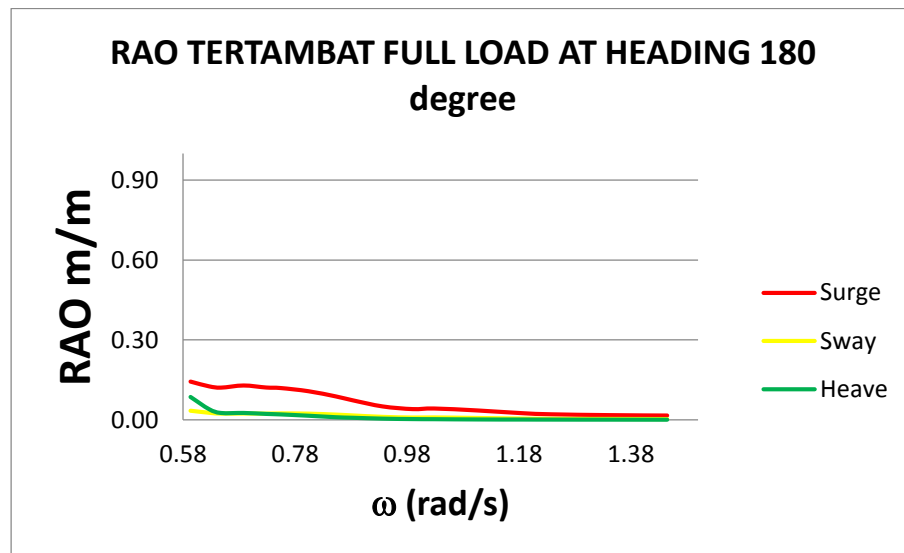
**Gambar 4.25** Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 90 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.25 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan penuh dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 90 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *sway* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *sway* sebesar 0,18 m/m dan *heave* sebesar 0,14 m/m pada kondisi muatan FSO penuh.



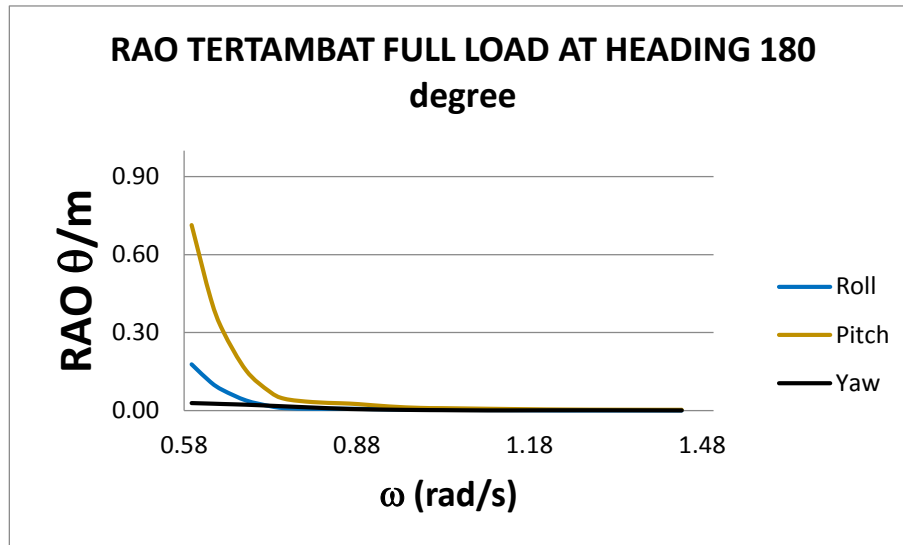
**Gambar 4.26** Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 90 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.26 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan penuh dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 90 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *roll* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *roll* sebesar 0,88 derajat/m.



**Gambar 4.27** Grafik RAO Translasi FSO Tertambat 180 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.27 di atas menunjukkan grafik RAO translasi FSO muatan penuh dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 180 derajat sangat mempengaruhi gerakan translasi *surge* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *surge* sebesar 0,19 m/m dan *heave* sebesar 0,16 m/m pada kondisi muatan FSO kosong serta frekuensi gelombang datang di bawah 0,6 rad/s.

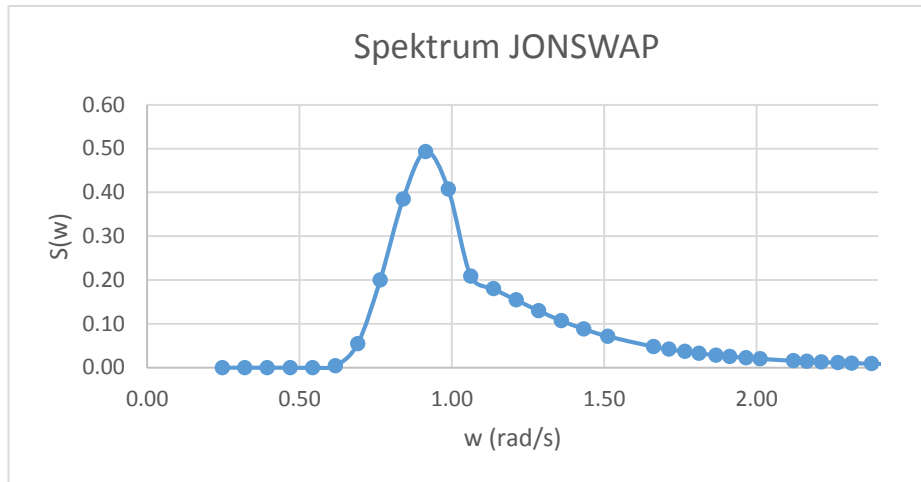


**Gambar 4.28** Grafik RAO Rotasi FSO Tertambat 180 derajat kondisi *full load*

Pada Gambar 4.28 di atas menunjukkan grafik RAO rotasi FSO muatan penuh dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa arah pembebanan gelombang 180 derajat sangat mempengaruhi gerakan rotasi *pitch* secara dominan dengan besaran nilai maksimum *pitch* sebesar 0,78 derajat/m kondisi muatan kosong.

#### 4.5 Spektrum Gelombang

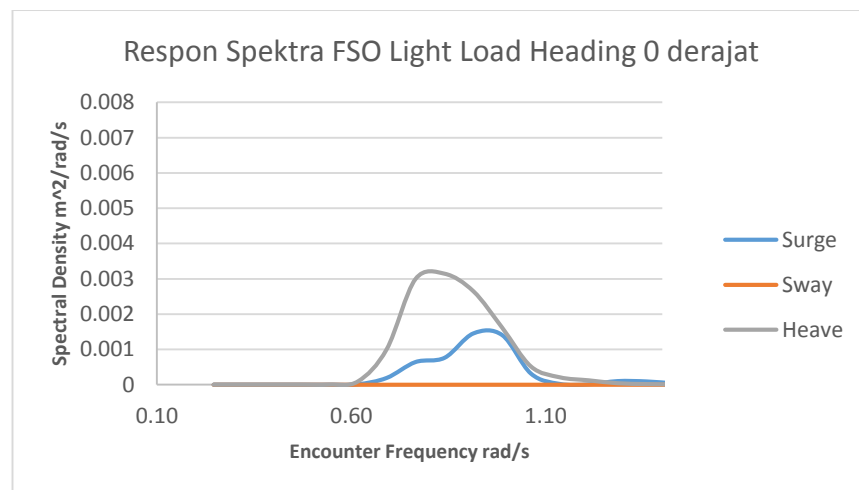
Spektrum Gelombang yang digunakan pada analisis karakteristik gerakan struktur *Single Point Mooring* dan FSO Arco Ardjuna adalah Spektrum Jonswap. Penggunaan spektrum gelombang JONSWAP dikarenakan blok ardjuna yang merupakan lokasi Arco Ardjuna beroperasi terletak di perairan Laut Jawa yang notabene merupakan perairan tertutup. Letak lokasi FSO Arco Ardjuna yang merupakan perairan terttp merupakan pertimbangan mendasar penggunaan spektrum gelombang JONSWAP yang juga merupakan spektrum gelombang pada perairan tertutup. Gambar 4.29 di bawah ini menunjukkan grafik spektrum gelombang JONSWAP untuk perairan blok Ardjuna PHE ONWJ.



**Gambar 4.29** Spektrum Gelombang JONSWAP Perairan Laut Jawa dengan  $H_s = 1,8$  m

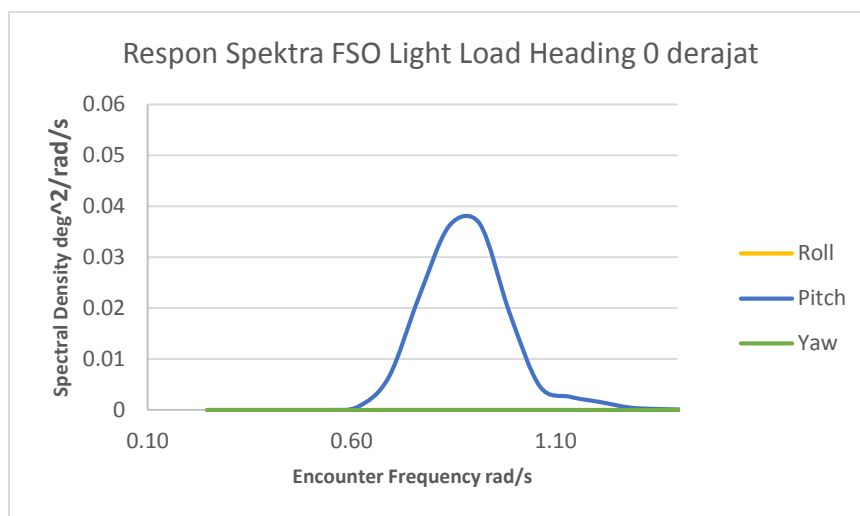
#### 4.6 Respon Spektra FSO Arco Ardjuna saat kondisi tertambat

Perhitungan respon spektra pada FSO Arco Ardjuna dilakukan pada kondisi muatan *Light Load* maupun *Full Load* dengan kedalaman laut 45 m saat tertambat pada SPM. Grafik respon spektra pada FSO dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll* dan *pitch*. Berikut adalah grafik respon spektra pada FSO Arco Ardjuna dengan *heading* pembebanan  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  dan  $180^\circ$  dapat dilihat pada Gambar 4.30 sampai Gambar 4.41 di bawah ini.



**Gambar 4.30** Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *light load* dan *heading* 0 derajat

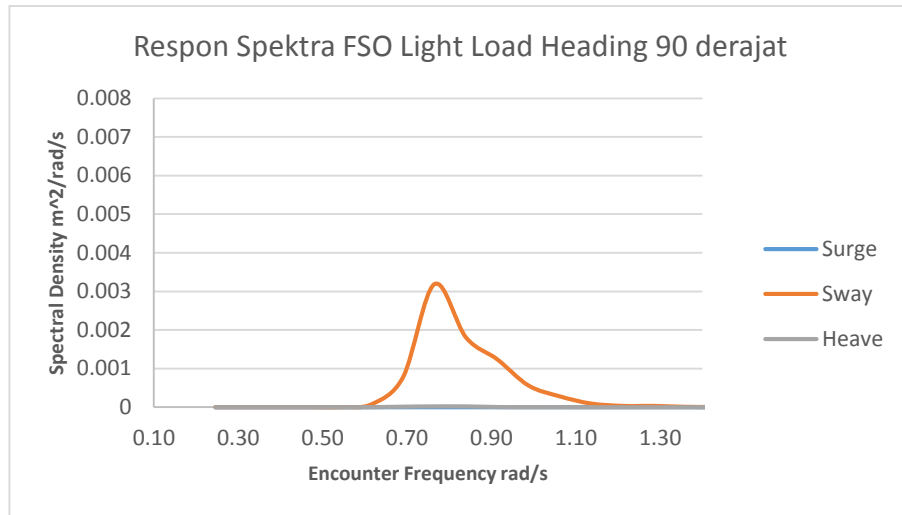
Pada Gambar 4.30 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan translasi FSO muatan kosong yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat, gerakan *surge* yang terjadi sebesar  $0,0017 \text{ m}^2/\text{rad/s}$  serta gerakan *heave* yang terjadi sebesar  $0,0032 \text{ m}^2/\text{rad/s}$ .



**Gambar 4.31** Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *light load* dan *heading* 0 derajat

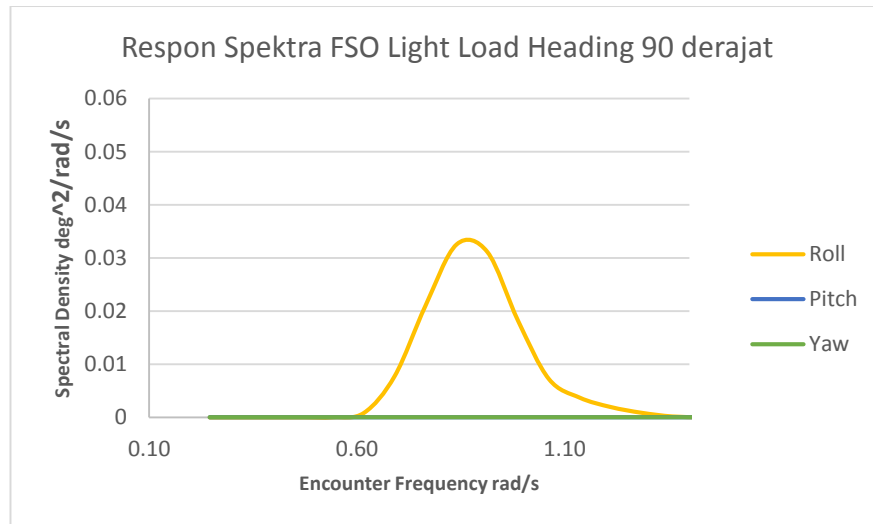
Pada Gambar 4.31 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan rotasi FSO muatan kosong yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat, gerakan *pitch* yang terjadi sebesar  $0,038 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$ .





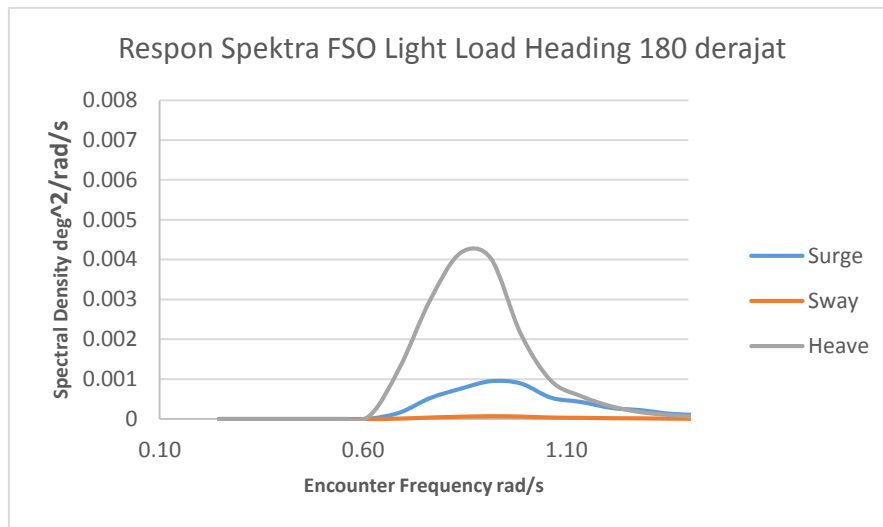
**Gambar 4.32** Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *light load* dan *heading* 90 derajat

Pada Gambar 4.32 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan translasi FSO muatan kosong yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO, gerakan *sway* yang terjadi sebesar 0,0033 m<sup>2</sup>/rad/s.



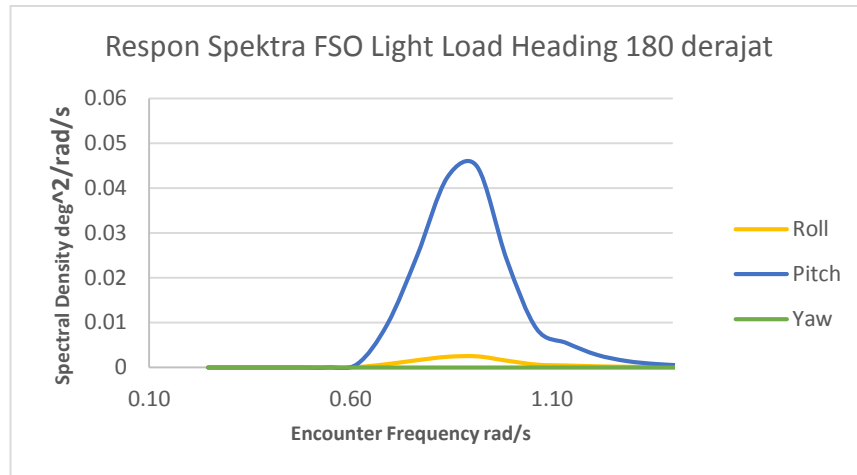
**Gambar 4.33** Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *light load* dan *heading* 90 derajat

Pada Gambar 4.33 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan rotasi FSO muatan kosong yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat, gerakan *roll* yang terjadi sebesar  $0,035 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$ .



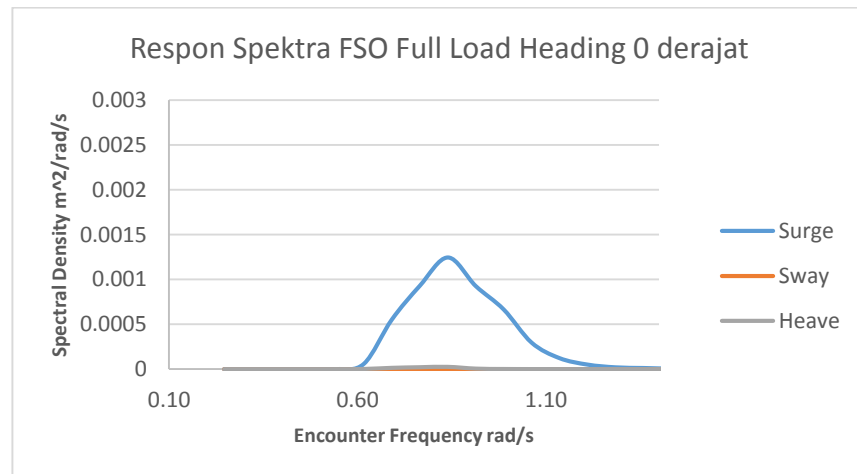
**Gambar 4.34** Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *light load* dan *heading* 180 derajat

Pada Gambar 4.34 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan translasi FSO muatan kosong yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat, gerakan *surge* yang terjadi sebesar  $0,001 \text{ m}^2/\text{rad/s}$  serta gerakan *heave* yang terjadi sebesar  $0,0043 \text{ m}^2/\text{rad/s}$ .



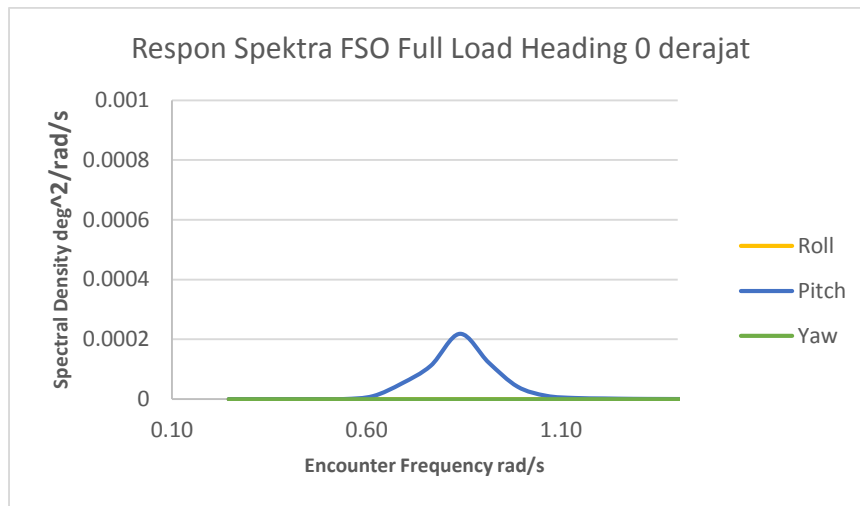
**Gambar 4.35** Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *light load* dan *heading* 180 derajat

Pada Gambar 4.35 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan rotasi FSO muatan kosong yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO, gerakan *pitch* yang terjadi sebesar 0,051 deg<sup>2</sup>/rad/s.



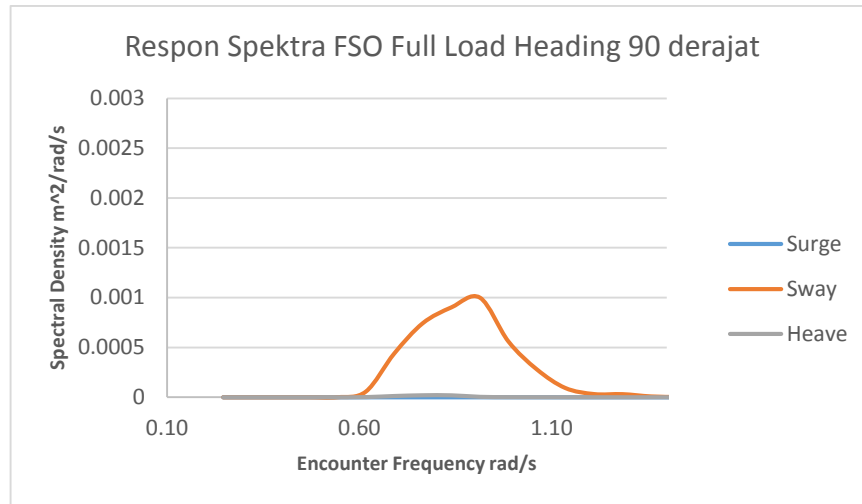
**Gambar 4.36** Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *full load* dan *heading* 0 derajat

Pada Gambar 4.36 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan translasi FSO muatan penuh yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat, gerakan *surge* yang terjadi sebesar  $0,0012 \text{ m}^2/\text{rad/s}$ .



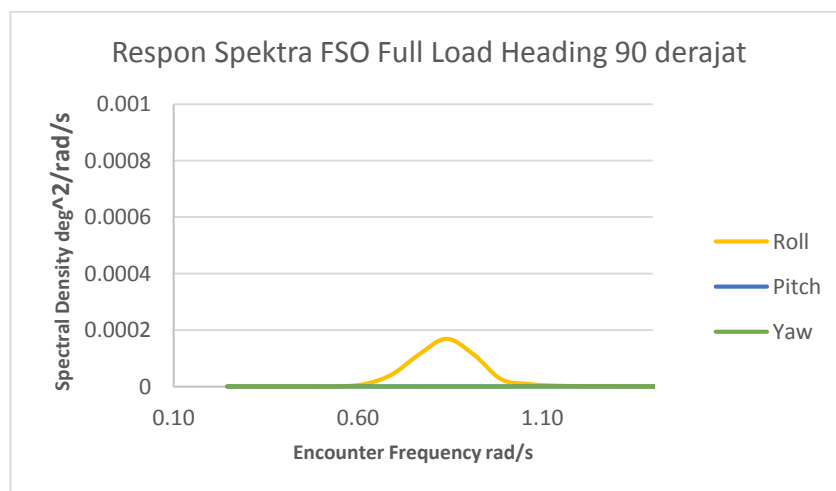
**Gambar 4.37** Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *full load* dan *heading* 0 derajat

Pada Gambar 4.37 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan rotasi FSO muatan penuh yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 0 derajat, gerakan *pitch* yang terjadi sebesar  $0,0002 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$ .



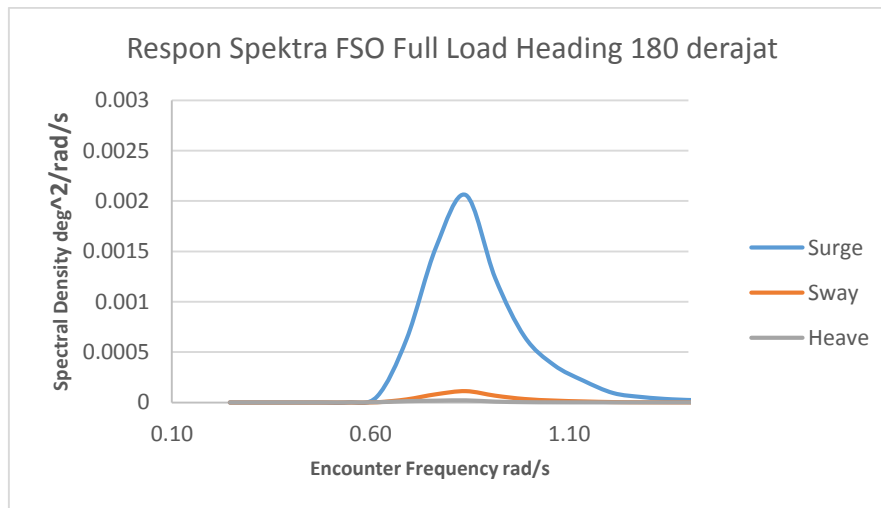
**Gambar 4.38** Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *full load* dan *heading* 90 derajat

Pada Gambar 4.38 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan translasi FSO muatan penuh yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat, gerakan *sway* yang terjadi sebesar 0,001 m<sup>2</sup>/rad/s.



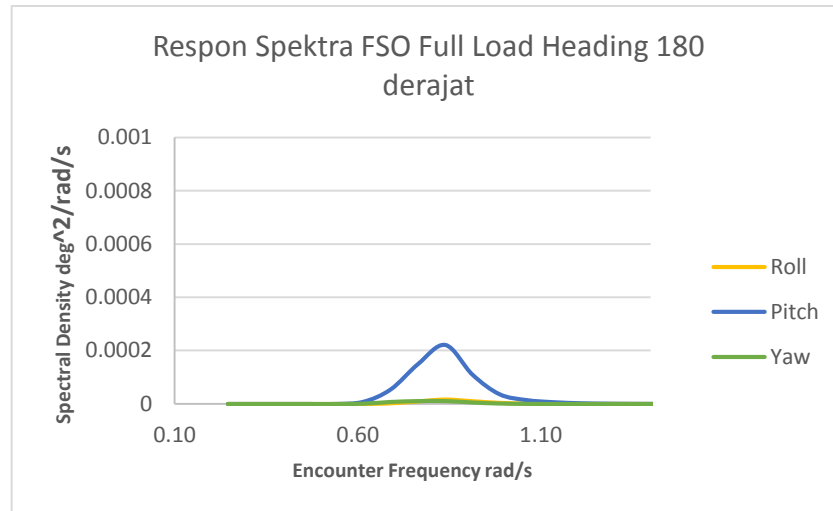
**Gambar 4.39** Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *full load* dan *heading* 90 derajat

Pada Gambar 4.39 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan rotasi FSO muatan penuh yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 90 derajat, gerakan *roll* yang terjadi sebesar  $0,00018 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$ .



**Gambar 4.40** Grafik Respon Spektra gerakan translasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *full load* dan *heading* 180 derajat

Pada Gambar 4.40 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan translasi FSO muatan penuh yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat, gerakan *surge* yang terjadi sebesar  $0,002 \text{ m}^2/\text{rad/s}$ .



**Gambar 4.41** Grafik Respon Spektra gerakan rotasi FSO saat tertambat dalam kondisi muatan *full load* dan *heading* 180 derajat

Pada Gambar 4.41 di atas menunjukkan grafik spektra respon FSO pada perairan Ardjuna menggunakan spektrum gelombang JONSWAP untuk gerakan rotasi FSO muatan penuh yang dalam kondisi tertambat pada SPM dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat terhadap FSO. Dapat diamati bahwa dengan arah pembebanan gelombang 180 derajat, gerakan *pitch* yang terjadi sebesar  $0,00021 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$ .

#### 4.7 Single Amplitude Accelerations

Dari grafik RAO di atas secara umum dapat dengan mudah mengetahui dan membandingkan gerakan paling dominan untuk masing – masing arah. Grafik di atas dibagi dalam tiap – tiap heading, dimana tiap – tiap heading terdapat 6 gerakan. Dari grafik di atas dapat kita lihat gerakan yang paling dominan adalah *heaving*, *rolling* dan *pitching* yang memiliki simpangan amplitude terbesar.

Hasil dari perhitungan maximum *single amplitude accelerations* dengan Ansys Aqwa pada FSO Arco Ardjuna pada kondisi tertambat dapat kita tabulasi seperti pada Tabel 4.4 di bawah ini.

**Tabel 4.4** Output maksimum *single amplitude accelerations*

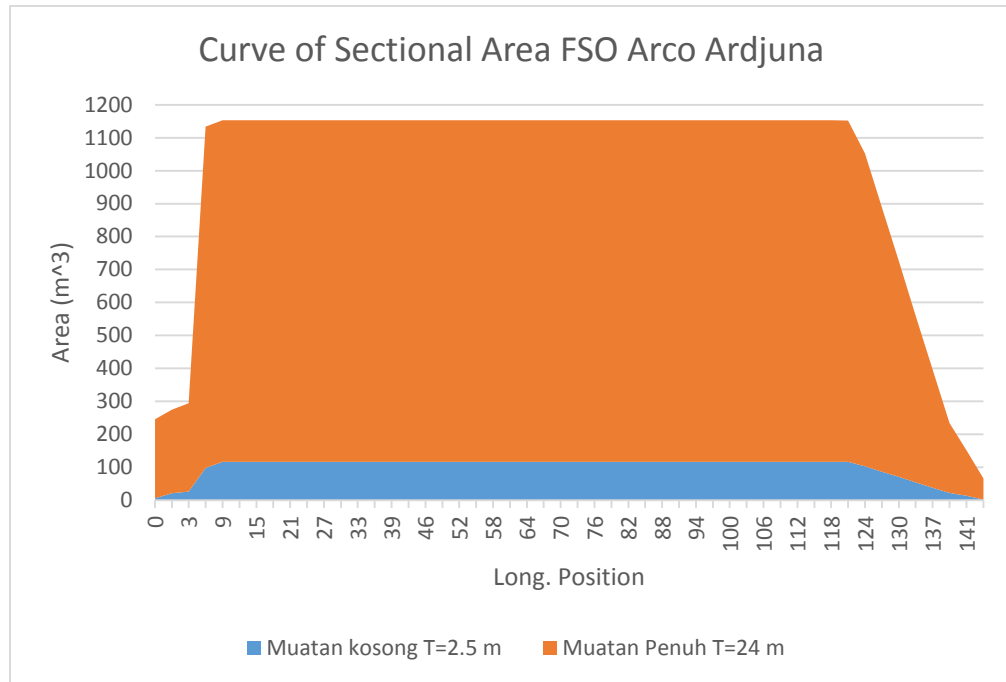
Gerakan	Single Amplitude Acceleration (m/s <sup>2</sup> )						Max
	Heading 0 derajat		Heading 90 derajat		Heading 180 derajat		
	Light	Full	Light	Full	Light	Full	
Surge	0,0410	0,1629	0	0	0,5843	0,3259	0,5843
Sway	0	0	0,8489	0,1765	0	0	0,8489
Heave	0,0006	0,0001	0	0	0,0012	0,0002	0,0012
Roll	0	0	0,0407	0,0212	0	0	0,0407
Pitch	0,0571	0,0217	0	0	0,0731	0,0211	0,0731
Yaw	0	0	0,0247	0,0068	0	0	0,0247

Dari data diatas didapatkan nilai maksimum *single amplitude acceleration* dari FSO Arco Ardjuna kondisi full load saat tertambat dari tiap gerakan, *surge* pada *heading* 180° adalah 0.054847 m/s<sup>2</sup> , *sway* pada *heading* 90° adalah 0.849 m/s<sup>2</sup> , *heave* pada *heading* 0° adalah 0.006 m/s<sup>2</sup> , *roll* pada *heading* 90° adalah 0.0005656 rad/s<sup>2</sup> , *pitch* pada *heading* 0° adalah 0.00173 rad/s<sup>2</sup> dan *yaw* pada *heading* 90° adalah 0.0000112 rad/s<sup>2</sup> . Nilai maksimum *single amplitude acceleration* dari tiap gerakan akan dipakai dalam perhitungan beban inersia akibat gelombang.

#### 4.8 Curve of Sectional Area

Dari pemodelan FSO Arco Ardjuna pada software Maxsurf diperoleh hasil luaran Sectional Area yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan shear force dan bending moment kekuatan memanjang kapal. *Curve of Sectional Area* FSO Arco Ardjuna disajikan pada Gambar 4.42.





**Gambar 4.42** *Curve of Sectional Area FSO Arco Ardjuna*

#### 4.9 Penyebaran Berat FSO Arco Ardjuna

Pada kapal ada dua jenis berat yang ada dalam operasinya yaitu LWT (Light Weight Tonnage) dan DWT (Dead Weight Tonnage). FSO (Floating Storage Unit) sebagai floating body atau benda mengapung di laut juga memiliki sifat – sifat berat kapal tersebut. LWT adalah berat kapal kosong beserta permesinan dan perlengkapan yang tidak berubah dalam fungsi waktu, lalu DWT adalah berat muatan, bahan bakar, makanan, air bersih serta lain – lainnya akan berubah dalam fungsi waktu pengoperasian kapal. Pemodelan serta perhitungan pemuatan DWT dilakukan dengan 2 kondisi variasi muatan.

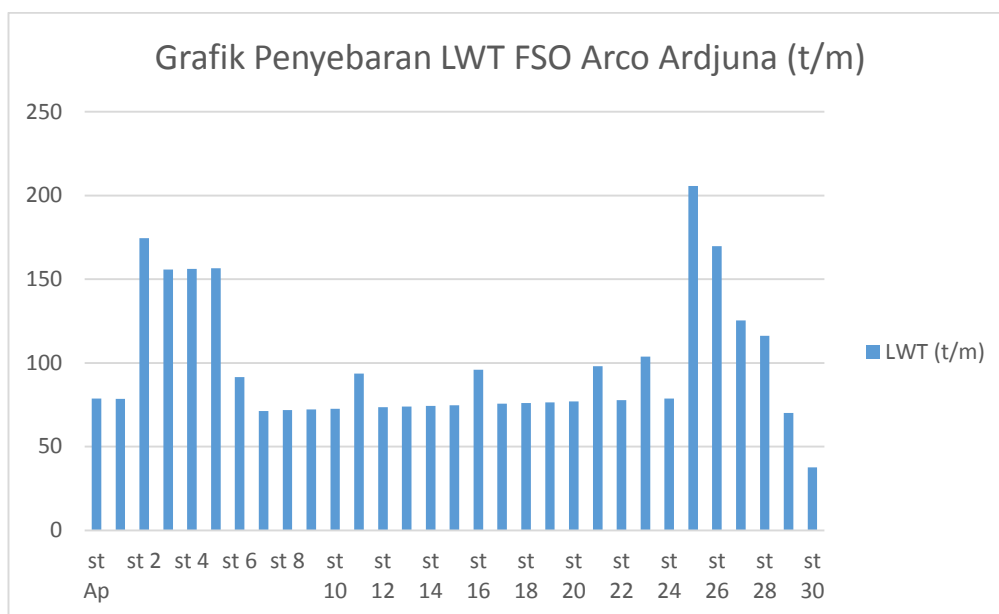
- FSO Arco Ardjuna dengan muatan penuh 95% (Full Load)
- FSO Arco Ardjuna dengan muatan kosong 0% (Empty Load)

Perhitungan berat kapal digunakan untuk mengetahui gaya – gaya tekan ke bawah (gaya berat kapal) yang berkontribusi terhadap perhitungan kekuatan memanjang kapal.

Berat – berat yang dipertimbangkan dalam perhitungan LWT FSO Arco Ardjuna antara lain:

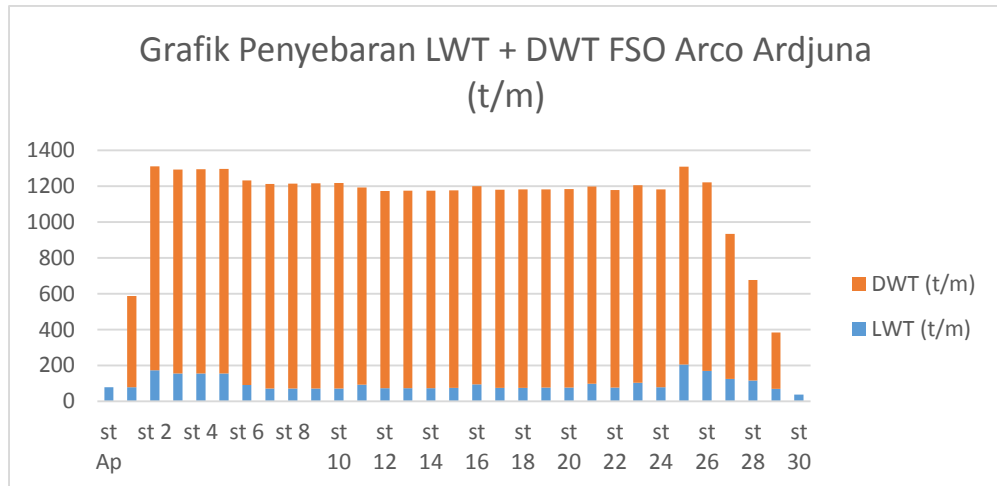
- Berat konstruksi dan perpipaan
- Berat peralatan dan perlengkapan

Berikut pada Gambar 4.43 di bawah ini adalah kurva penyebaran berat kosong FSO



**Gambar 4.43** Grafik penyebaran berat FSO Arco Ardjuna Muatan kosong

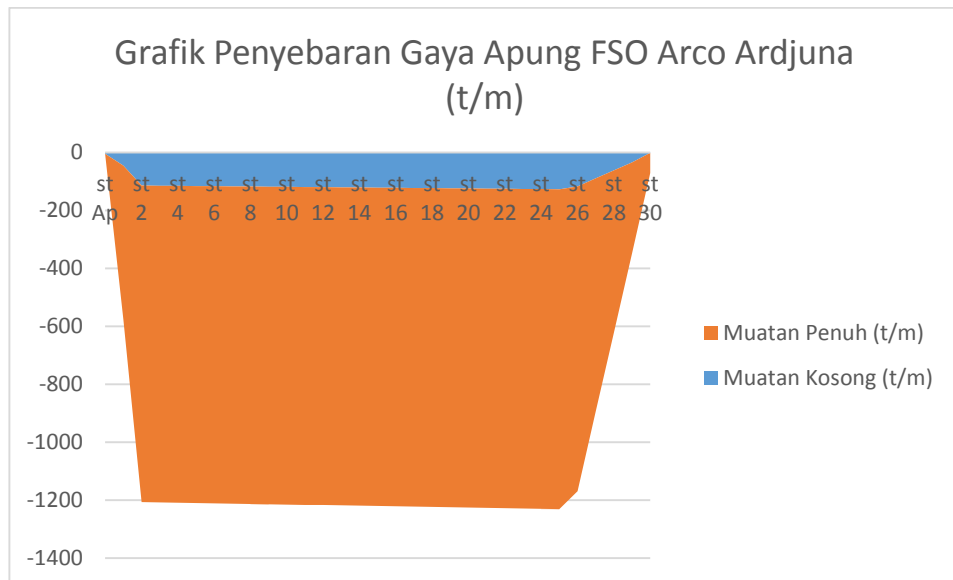
Sedangkan pada Gambar 4.44 selanjutnya diuraikan grafik penyebaran berat FSO dengan muatan penuh



**Gambar 4.44** Grafik penyebaran berat FSO Arco Ardjuna Muatan penuh (oranye :DWT, biru: LWT

#### 4.10 Penyebaran Gaya Apung FSO Arco Ardjuna

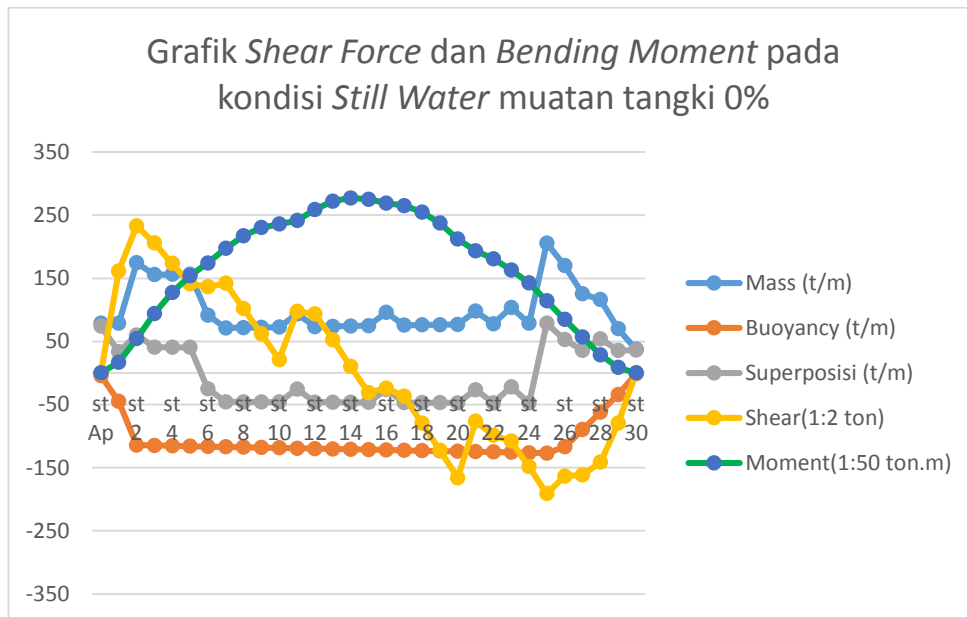
Penyebaran gaya apung FSO Arco Ardjuna dilakukan untuk mengetahui penyebaran gaya tekan keatas sebagai pengaruh dalam perhitungan kekuatan memanjang. Gambar 4.45 di bawah ini adalah grafik sebaran gaya apung FSO Arco Ardjuna



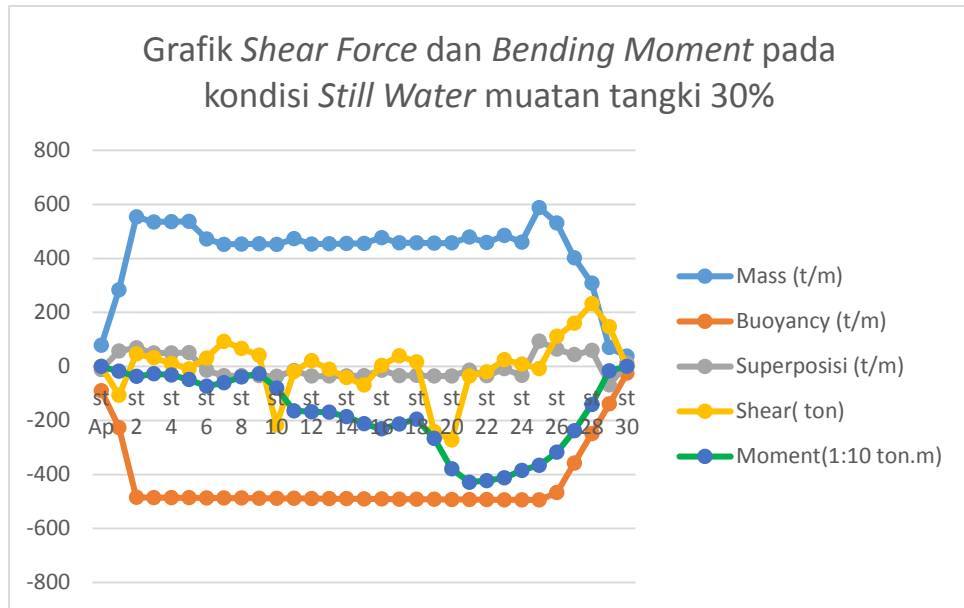
**Gambar 4.45** Grafik penyebaran gaya apung FSO Arco Ardjuna

#### 4.11 Analisis Penyebaran Tegangan Global Moment FSO Arco Ardjuna pada Kondisi Diam di Still Water

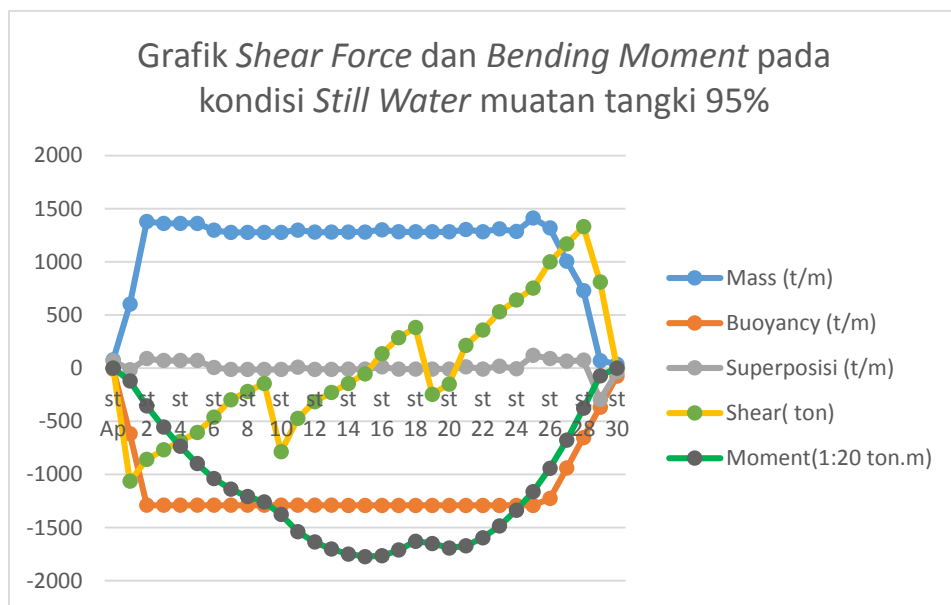
*Shear Force* atau gaya geser bangunan apung sepanjang panjang kapal dapat dihitung dengan memperhitungkan dari data hidrostatis (kurva bonjean; CSA) dan distribusi beban sepanjang kapal. Serta perhitungan *Bending Moment* dapat dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi beban dan penyebaran gaya apung sepanjang kapal (Bhattacharya, 1972:251). Berikut pada Gambar 4.46 dan 4.48 di bawah ini disajikan grafik *Shear Force* dan *Bending Moment* FSO pada kondisi diam (dalam dua variasi muatan; *light load* dan *full load*) di perairan tenang dengan bantuan perhitungan menggunakan *software* Maxsurf Advanced Stability dalam pengerjaannya.



**Gambar 4.46** Grafik penyebaran *shear force* dan *bending moment* *still water* pada variasi muatan tangki terisi 0%



**Gambar 4.47** Grafik penyebaran *shear force* dan *bending moment still water* pada variasi muatan tangki 30%



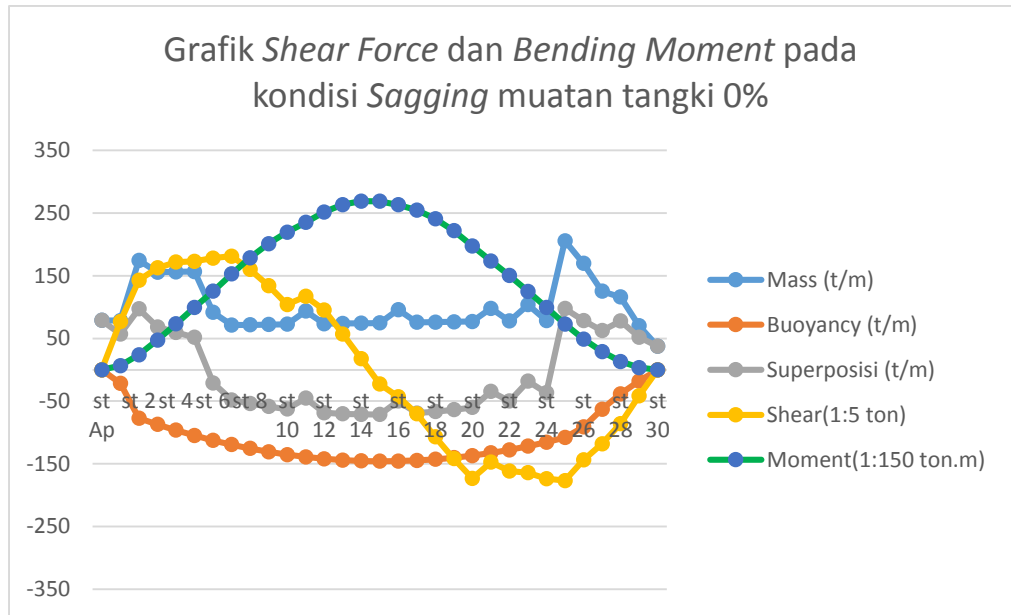
**Gambar 4.48** Grafik penyebaran *shear force* dan *bending moment still water* pada variasi muatan tangki 95%

#### **4.12 Penyebaran Shear Force dan Bending Moment FSO Arco Ardjuna Akibat Pengaruh Muatan Kondisi *Sagging-Hogging***

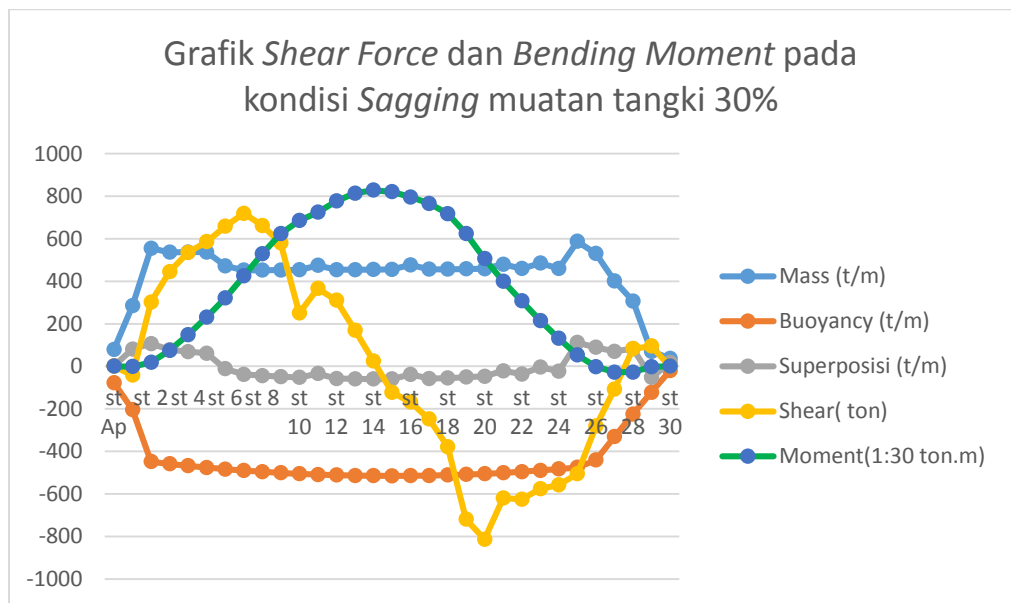
Tugas akhir ini menitik beratkan perhitungan kekuatan memanjang kapal dipengaruhi oleh gelombang regular, sehingga dalam perhitungan penyebaran *shear force* dan *bending moment* relative pada setiap station yang dipengaruhi oleh variasi muatan pada kondisi gelombang regular kondisi *sagging* dan *hogging* dengan kondisi – kondisi batas pemodelan yang telah dilakukan dan output yang diperoleh berupa penyebaran *shear force* dan *bending moment* relative pada setiap station yang dipengaruhi oleh variasi muatan *sagging hogging* pada kondisi gelombang regular.

Dalam perhitungan kelelahan beban lingkungan gelombang satu tahunan setinggi 1.8 meter digunakan sebagai inputan perhitungan untuk mengetahui titik yang mengalami tegangan maksimum akibat pengaruh gerakan struktur dalam kondisi *sagging hogging* gelombang regular. Sebaran LWT dan DWT FSO untuk masing – masing perhitungan kekuatan memanjang kapal akibat *sagging hogging* dimasukkan sebagai inputan untuk mendapatkan distribusi tegangan pada FSO Arco Ardjuna akibat gerakan struktur berupa sebaran *shear force* dan *bending moment*.

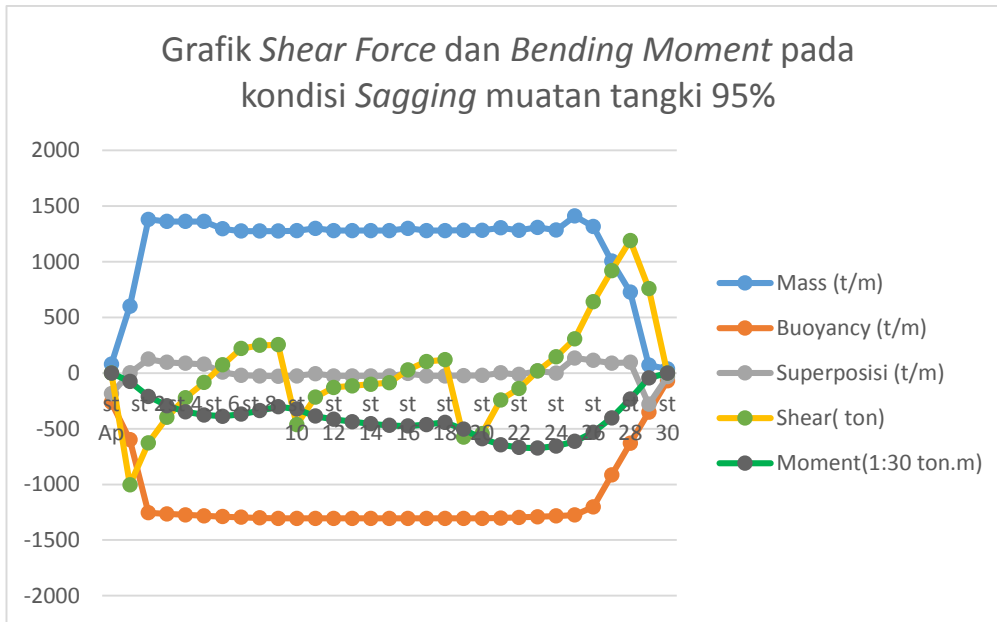
Berikut pada Gambar 4.49 hingga 4.54 di bawah ini disajikan hasil luaran perhitungan *shear force* dan *bending moment* akibat gelombang regular pada saat terjadi *sagging* dan *hogging* yang dianalisis menggunakan bantuan software Maxsurf Advanced Stability.



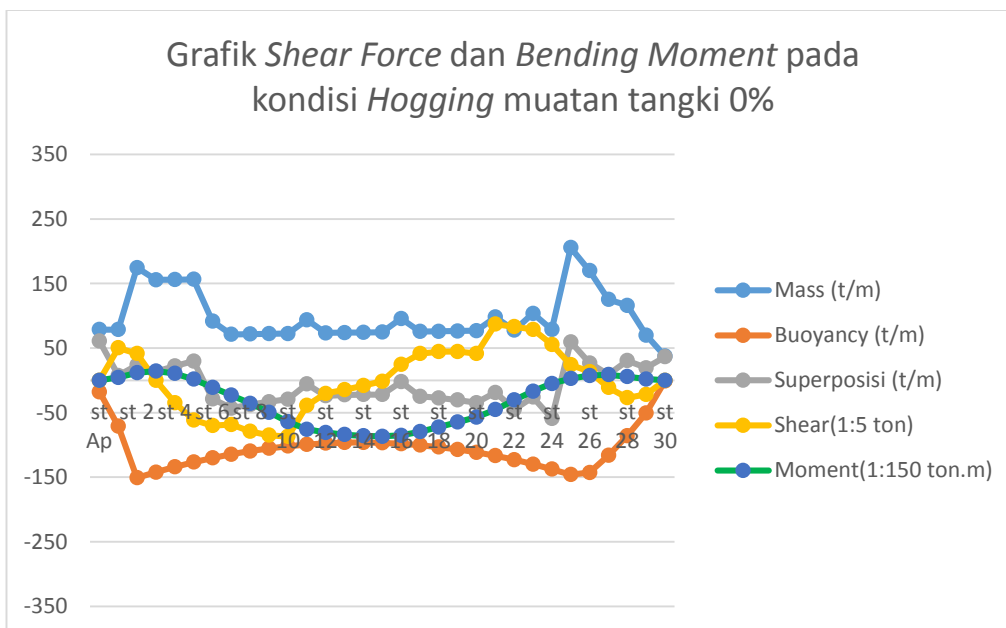
**Gambar 4.49** Grafik penyebaran *shear force* dan *bending moment* akibat *Sagging* Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 0%



**Gambar 4.50** Grafik penyebaran *shear force* dan *bending moment* akibat *Sagging* Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 30%

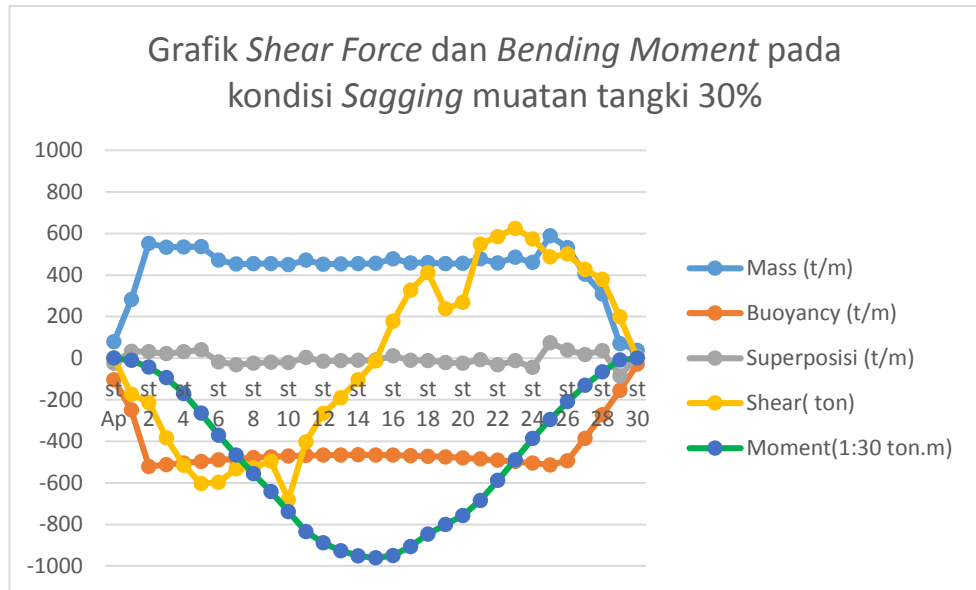


**Gambar 4.51** Grafik penyebaran *shear force* dan *bending moment* akibat *Sagging* Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 95%

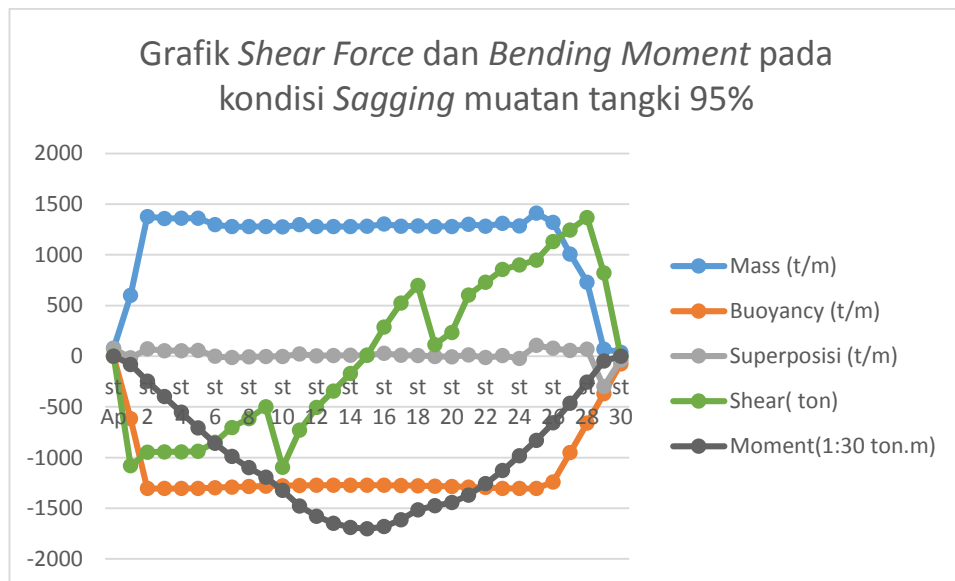


**Gambar 4.52** Grafik penyebaran *shear force* dan *bending moment* akibat *Hogging* Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 0%





**Gambar 4.53** Grafik penyebaran *shear force* dan *bending moment* akibat *Hogging* Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 30%



**Gambar 4.54** Grafik penyebaran *shear force* dan *bending moment* akibat *Hogging* Gelombang reguler pada variasi muatan tangki 95%

#### 4.13 Shear Force dan Bending Moment Sebagai Beban Pada Analisis Tegangan Konstruksi Midship Section

*Crane Pedestal* terletak pada koordinat 87.4 m dari AP atau frame 18. Di dalam tugas akhir ini shear force dan bending moment digunakan sebagai pembebanan terhadap analisis dalam memperoleh tegangan pada konstruksi midship section frame 16,17,18,19 dan 20 untuk beberapa titik uji yang berguna untuk menghitung umur kelelahan sambungan antara konstruksi pedestal dengan hull structure. Berikut dibawah ini adalah Tabel 4.5 yang menunjukkan pembebanan shear force dan bending moment untuk konstruksi frame 16,17,18,19 dan 20 yang diperoleh dari hasil perhitungan shear force dan bending moment akibat beban gelombang regular.

**Tabel 4.5** *Shear Force dan Bending Moment pada Frame 16,17,18,19 dan 20 FSO Arco Ardjuna Pada Regular Waves*

Shear Force ( $\times 10^3$ Ton) and Bending Moment ( $\times 10^3$ Ton.m)								
Frame Number	Sagging Effect of Regular Waves				Hogging Effect of Regular Waves			
	Shear Force		Bending Moment		Shear Force		Bending Moment	
	Light load	Full load	Light Load	Full Load	Light load	Full load	Light Load	Full Load
Frame 16	0.19	0.49	-21.61	-32.02	-0.29	0.01	48.74	38.63
Frame 17	0.34	0.66	-20.27	-29.21	-0.50	-0.17	46.95	38.33
Frame 18	0.40	0.75	-18.45	-25.80	-0.74	-0.40	44.04	37.00
Frame 19	0.45	0.83	-16.34	-21.96	-0.96	-0.59	40.07	34.71
Frame 20	0.45	0.87	-14.09	-17.82	-1.13	-0.75	35.20	31.62

#### 4.14 Perhitungan Gaya Gerak Translasi Crane Akibat Akselerasi Gerakan Translasi FSO

Gaya gerak translasi merupakan gaya yang dipengaruhi oleh massa benda terhadap percepatan yang dialaminya secara translasi, yang dimana

dalam kasus ini massa benda adalah massa struktur *crane* yang akan diinstal di atas konstruksi *crane pedestal* sebesar 60.76 ton sementara percepatan yang digunakan dalam perhitungan merupakan percepatan gerak translasional bangunan FSO akibat gerakan *surge*, *sway*, dan *heave* yang sebelumnya telah dibahas pada subbab 4.5. Gaya gerak translasi dihitung sesuai dengan hukum Newton benda yang memiliki percepatan dengan persamaan;

$$F=m \times a$$

Berikut pada Tabel 4.6 di bawah ini adalah Tabel hasil serta perhitungan gaya gerak translasi *crane* akibat percepatan gerakan translasional FSO pada variasi muatan *light load* dan *full load*

**Tabel 4.6** Tabel hasil serta perhitungan gaya gerak translasi pada Crane dengan variasi muatan *light load*

Motion	Degree of Freedom (Degree)	Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	Inertial Force (N)	Inertial Force (KN)
Surge	0	0,0410	2490	2,49
	90	0	0	0
	180	0,5843	35500	35,5
Sway	0	0	0	0
	90	0,8489	51580	51,58
	180	0	0	0
Heave	0	0,0006	36,7713	0,0367713
	90	0	0	0
	180	0,0012	74,8954	0,0748954

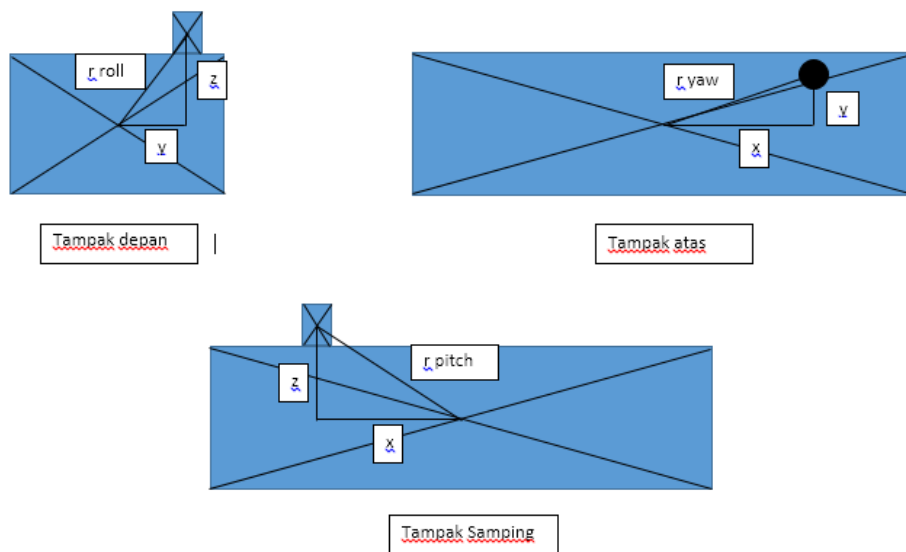
**Tabel 4.7** Tabel hasil serta perhitungan gaya gerak translasi pada Crane dengan variasi muatan *full load*

Motion	Degree of Freedom (Degree)	Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	Inertial Force (N)	Inertial Force (KN)
Surge	0	0,1629	9900	9,9
	90	0	0	0
	180	0,3259	19800	19,8
Sway	0	0	0	0
	90	0,1765	10725	10,725
	180	0	0	0

Heave	0	0,0001	3,6349	0,0036349
	90	0	0	0
	180	0,0002	12,69932	0,01269932

#### 4.15 Perhitungan Momen Gaya Angular (Torsi) Crane Akibat Akselerasi Gerakan Rotasional FSO

Momen gaya angular atau torsi pada dasarnya sama dengan gaya gerak rotasional. Torsi menunjukkan kemampuan sebuah gaya dalam membuat benda bergerak melakukan gerak rotasi terhadap percepatan sudut dan panjang lengan terhadap sudut putarnya, dalam kasus ini percepatan yang digunakan dalam perhitungan merupakan percepatan gerak translasional bangunan FSO akibat gerakan *roll*, *pitch* dan *yaw* yang sebelumnya telah dibahas pada subbab 4.5 serta panjang lengan yang dimaksud adalah panjang antara titik berat FSO terhadap titik berat *crane* seperti Gambar 4.5 di bawah ini



**Gambar 4.55** Ilustrasi posisi *crane* terhadap COG FSO

Dari Gambar 4.55 diketahui:

- Massa crane	=	60.76 ton
- LCG FSO light load	=	1.29 m dari midship
- LCG FSO full load	=	2.17 m dari midship
- VCG FSO light load	=	14.04 m dari keel
- VCG FSO full load	=	13.44 m dari keel
- x light load	=	12.51 m
- x full load	=	11.63 m
- y light load	=	22.56 m
- y full load	=	22.56 m
- z light load	=	17.31 m
- z full load	=	17.91 m
- r roll light load	=	28.44 m
- r roll full load	=	28.81 m
- r pitch light load	=	28.355 m
- r pitch full load	=	21.353 m
- r pitch light load	=	25.79 m
- r pitch full load	=	25.38 m

momen torsi pada crane akibat percepatan gerakan rotasional FSO dihitung menggunakan rumus:

$$\tau = m \times r^2 \times \omega$$

Berikut di bawah ini adalah Tabel 4.8 dan 4.9 hasil serta perhitungan momen torsi *crane* akibat percepatan gerakan rotasional FSO pada variasi muatan *light load* dan *full load*

**Tabel 4.8** Tabel hasil serta perhitungan momen gaya angular (tors) pada Crane dengan variasi muatan *light load*

Motion	Degree of Freedom (Degree)	Acceleration (rad/s <sup>2</sup> )	Angular Moment of Force (Torque) KN.m			
Roll	0	0	0	N.m	0	KN.m
	90	0,0407	2051700	N.m	2051,7	KN.m
	180	0	0	N.m	0	KN.m
Pitch	0	0,0571	1580700	N.m	1580,7	KN.m
	90	0	0	N.m	0	KN.m
	180	0,0731	2026200	N.m	2026,2	KN.m
Yaw	0	0	0	N.m	0	KN.m
	90	0,0247	967130	N.m	967,13	KN.m
	180	0	0	N.m	0	KN.m

**Tabel 4.9** Tabel hasil serta perhitungan momen gaya angular (tors) pada Crane dengan variasi muatan *full load*

Motion	Degree of Freedom (Degree)	Acceleration (rad/s <sup>2</sup> )	Angular Moment of Force (Torque) KN.m			
Roll	0	0	0	N.m	0	KN.m
	90	0,0212	1068000	N.m	1068	KN.m
	180	0	0	N.m	0	KN.m
Pitch	0	0,0217	600000	N.m	600	KN.m
	90	0	0	N.m	0	KN.m
	180	0,0211	584000	N.m	584	KN.m
Yaw	0	0	0	N.m	0	KN.m
	90	0,0068	267130	N.m	267,13	KN.m
	180	0	0	N.m	0	KN.m

#### 4.16 Tegangan Aksial

Tegangan aksial (tegangan normal) adalah intensitas gaya pada suatu titik yang tegak lurus terhadap penampang. Berdasarkan data *General Arrangement Crane* diketahui *maximum axial load* yang bekerja pada *bow crane pedestal* FSO sebesar 118.1 ton dan momen aksial maksimum yang terjadi sebesar 766.68 ton.m

#### 4.17 Perhitungan Beban Angin

Perhitungan beban angina meliputi perhitungan kecepatan, gaya dan momen angin.

##### 4.17.1 Perhitungan Kecepatan Angin

Data kecepatan angin yang digunakan adalah data kecepatan angina satu tahunan sebesar 12.3 m/s.

##### 4.17.2 Perhitungan Gaya Angin

Dari data kecepatan angin, kemudian dilakukan perhitungan gaya angin. Perhitungan dilakukan pada cerobong crane crane pedestal di atas deck dengan pertimbangan struktur tersebut memiliki ketinggian lebih di mana hal tersebut menyebabkan gaya angin menjadi besar. Perhitungan beban angin mengacu pada DNV RP C205, dengan persamaan:

$$F_w = CqS \sin \alpha$$

- Untuk mendapatkan tekanan angin  $q$ , digunakan persamaan

$$q = \frac{1}{2} \rho_a U_{T,z}^2$$

$$q = \frac{1}{2} \times 1.226 \times 12.3^2 = 92.74077 \text{ Pa}$$

- Untuk mendapatkan nilai koefisien bentuk, terlebih dahulu dihitung nilai Reynold Number (Re) dengan persamaan

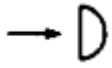
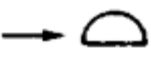
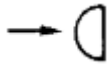
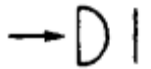

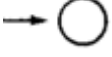
$$Re = \frac{D \cdot U_{T,z}}{V_a}$$

$$V_a$$

$$Re = \frac{1.346 \times 12.3}{1.55 \times 10^{-5}} = 1.068 \times 10^6$$

DNV RP C205 memberikan nilai koefisien bentuk berdasarkan nilai Reynold Number Seperti pada Tabel di 4.10 bawah ini

**Tabel 4.10** *Shapes Coefficients C for Sphere-Shaped Structure*

	<i>Structures</i>		<i>Shape Coefficient</i>
	<i>Hollow hemisphere, concavity to wind</i>		1.40
	<i>Hollow hemisphere</i>		0.35
	<i>Hollow or solid hemisphere, concavity to leeward</i>		0.40
	<i>Solid hemisphere and circular disc</i>		1.20
 	<i>Hemisphere on horizontal plane</i>		0.50
	<i>Sphere</i>	$Re \leq 4.2 \leq 10^5$	0.5
		$4.2 \times 10^5 < Re < 2 \times 10^6$	0.15
		$Re \geq 10^6$	0.20

(Sumber: DNV RP C205, 2007)

Oleh karena itu, nilai koefisien bentuknya adalah 0.15.

- Perhitungan luas bidang silinder yang terkena gaya angin adalah

$$S = 2\pi rL = 2 \times 3.14 \times 0.673 \times 2.348 = 9.924 \text{ m}^2$$

- $\alpha$  adalah sudut boom crane ( $22.5^\circ$ )
- Perhitungan gaya angin dapat ditulis dengan persamaan

$$F_w = C_q S \sin \alpha$$

$$F_w = 0.15 \times 92.74077 \times 9.924 \times \sin 22.5^\circ = 67.2563 \text{ N}$$



#### 4.17.3 Momen Angin

Dari gaya angin dapat dicari momen yang terjadi pada sambungan crane pedestal dengan geladak akibat gaya angin. Momen dicari dengan cara mengalikan gaya dengan panjang lengan. Panjang Lengan adalah jarak antara titik pada elevasi tertentu yang terkena gaya angin dengan titik pada crane pedestal di dekat sambungan dengan geladak dimana dilakukan perhitungan. Perhitungan untuk momen pada lengan *crane* 2.348 m dengan kecepatan angin 12.3 m/s adalah

$$M = F_w \times l = 67.2563 \times 2.348 = -157.918 \text{ N.m}$$

#### 4.17.4 Beban Angkat Crane

Dari data *General Arrangement Crane* diketahui kemampuan angkat maksimum *crane* adalah 116.8 Ton dan *maximum dynamic moment* nya adalah 1002.2 Ton.m.

#### 4.18 Parameter Pembebanan

Setelah beberapa subbab sebelumnya telah dianalisis jenis – jenis beban yang akan diberikan pada *bow crane pedestal* dan sambungan *hull construction* untuk mendapatkan tegangan yang terjadi sebagai acuan perhitungan umur kelelahan sambungan antar *crane pedestal* dan *hull structure* maka dibawah ini adalah Tabel 4.11 yang menunjukkan parameter pembebanan akibat beban lingkungan dan kekuatan memanjang untuk masing – masing kondisi *light load* dan *full load*.

**Tabel 4.11** Tabel parameter pembebanan kondisi *light load*

No	Parameter pembebanan		0 °	90 °	180 °	Unit
1	Gaya Inersia	<i>Surge</i>	2,49	0	35,5	kN
		<i>Sway</i>	0	51,58	0	kN
		<i>Heave</i>	0,0368	0	0,075	kN
		<i>Roll</i>	0	2051,7	0	kN.m
		<i>Pitch</i>	1580,7	0	2026,2	kN.m
		<i>Yaw</i>	0	967,13	0	kN.m
2	<i>Max Axial Load</i>		116.8	116.8	116.8	Ton
3	<i>Max Dynamic Momen</i>		1002.2	1002.2	1002.2	Ton.m
4	<i>Momen Angin</i>		157.918	157.918	157.918	N.m

**Tabel 4.12** Tabel parameter pembebanan kondisi *full load*

No	Parameter pembebanan		0 °	90 °	180 °	Unit
1	Gaya Inersia	<i>Surge</i>	9,9	0	19,8	kN
		<i>Sway</i>	0	10,725	0	kN
		<i>Heave</i>	0,0036	0	0,0127	kN
		<i>Roll</i>	0	1068	0	kN.m
		<i>Pitch</i>	600	0	584	kN.m
		<i>Yaw</i>	0	267,13	0	kN.m
2	<i>Max Axial Load</i>		116.8	116.8	116.8	Ton
3	<i>Max Dynamic Momen</i>		1002.2	1002.2	1002.2	Ton.m
4	<i>Momen Angin</i>		157.918	157.918	157.918	N.m

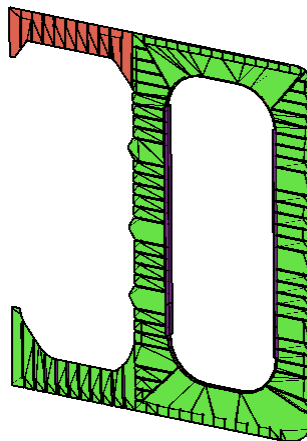
#### 4.19 Permodelan Konstruksi Lambung Kapal

Di dalam analisis umur kelelahan konstruksi crane pedestal pada struktur apung FSO Arco Ardjuna ini tidak secara keseluruhan dimodelkan melainkan hanya meliputi konstruksi setengah dari frame 16, 17, 18, 19, 20 beserta wall dan konstruksi crane pedestal yang diletakkan pada frame 18. Untuk dimensi ketebalan dari masing-masing frame diambil 80% dari dimensi pada data, hal ini mengacu pada aturan BKI Volume II “*Rules For Hull Construction*”

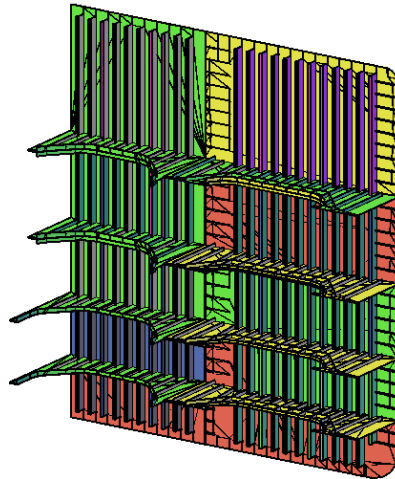
dengan memperhatikan *corrothion allowance* sehingga ketebalan pada masing-masing yang digunakan adalah 10.16 mm dari data awalnya 12.7 mm. Berikut dibawah ini adalah beberapa frame dan konstruksi crane pedestal yang telah dimodelkan dengan bantuan software Autodesk AutoCad 2015 ditunjukkan pada Gambar 4.56 hingga 4.58



**Gambar 4.56** Pemodelan 3D konstruksi frame 16



**Gambar 4.57** Pemodelan 3D konstruksi frame 17,18 dan19



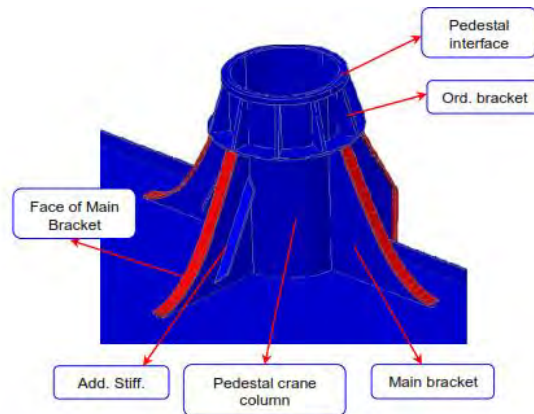
**Gambar 4.58** Pemodelan 3D konstruksi frame 20 (bulkhead construction)

#### 4.20 Permodelan Konstruksi *Bow Crane Pedestal*

Di dalam analisis umur kelelahan konstruksi crane pedestal pada struktur apung FSO Arco Ardjuna ini tidak secara keseluruhan dimodelkan melainkan hanya Berdasarkan *arrangement drawing outer diameter* dari *bow crane pedestal* ini adalah 1346 mm dengan ketebalan 38 mm dan ketinggian pedestal 2348 mm (dari *main deck*). Tabel 4.13 dibawah ini menunjukkan dimensi keseluruhan konstruksi dari *bow crane pedestal* FSO Arco Ardjuna:

**Tabel 4.13** Dimensi *Bow Crane Pedestal* FSO Arco Ardjuna

<i>Structural Member Name</i>	Units	Dimension
<i>Pedestal Column</i>	mm	1346 OD, thk. 38, height. 2348
<i>Main Bracket (column to main deck)</i>	mm	1600 x 1650 x 46
<i>Face of main bracket</i>	mm	160 x 26
<i>Additional stiffner of main bracket</i>	mm	150 x 26
<i>Pedestal ring</i>	mm	1846 OD, thk. 26
<i>Pedestal interface</i>	mm	1486 OD, Thk. 74
<i>Ordinary bracket (pedestal ring to pedestal interface)</i>	mm	250 x 598 x 46
<i>Distance of pedestal ring to pedestal interface</i>	mm	624



**Gambar 4.59** Konstruksi *Bow Crane Pedestal* FSO Arco Ardjuna

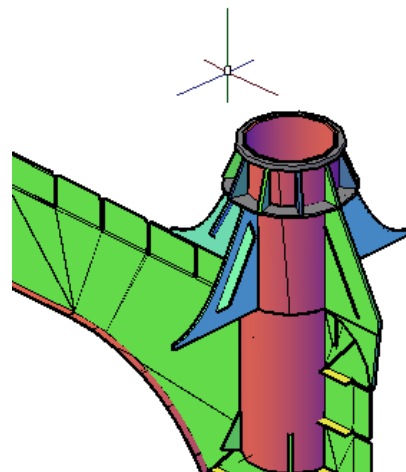
Model konstruksi *crane pedestal* sesuai gambar 4.59 dan 4.61 digunakan untuk analisis tegangan konstruksi *bow crane pedestal* di FSO Arco Ardjuna akibat pengaruh gaya inersia, gaya angin dan gaya axial dan momen angkat *crane* yang bekerja pada *crane pedestal*. Pemodelan pada Autocad 3D dibuat berdasarkan dimensi yang didapatkan dari data ukuran asli *construction profile* di FSO Arco Ardjuna (lihat foto eksisting *crane* pada gambar 4.57) dengan memperhatikan *corroton allowance*, sehingga dimensi pada pemodelan yang digunakan 80% dari data awal. Untuk konstruksi di bawah *hull* dimodelkan sepanjang 3 penegar memanjang di bawah *hull*, dimana pada posisi ini terdapat *side longitudinal stiffner 29* (LS 29) yang digunakan sebagai pembatas/ tumpuan untuk konstruksi *crane pedestal* yang ada di bawah *hull*. Jenis material konstruksi *girder* dan plat di FSO menggunakan Baja ASTM A36 dengan *yield strength* sebesar 250 MPa, sedangkan konstruksi *bow crane pedestal* menggunakan data material dari ABS grade A steel, berikut adalah Tabel 4.14 di bawah ini yang menjelaskan *material property* untuk *bow crane pedestal*:

**Tabel 4.14** *Material Properties Bow Crane Pedestal FSO Arco Ardjuna*

	<i>Units</i>	<i>Value</i>
<i>Density</i>	Ton/mm <sup>3</sup>	7.85 x 10 <sup>-9</sup>
<i>Yield Strength</i>	Mpa	235
<i>Shear Modulus</i>	N/m <sup>2</sup>	7.93 x 10 <sup>10</sup>
<i>Elastic Modulus</i>	N/m <sup>2</sup>	2 x 10 <sup>11</sup>



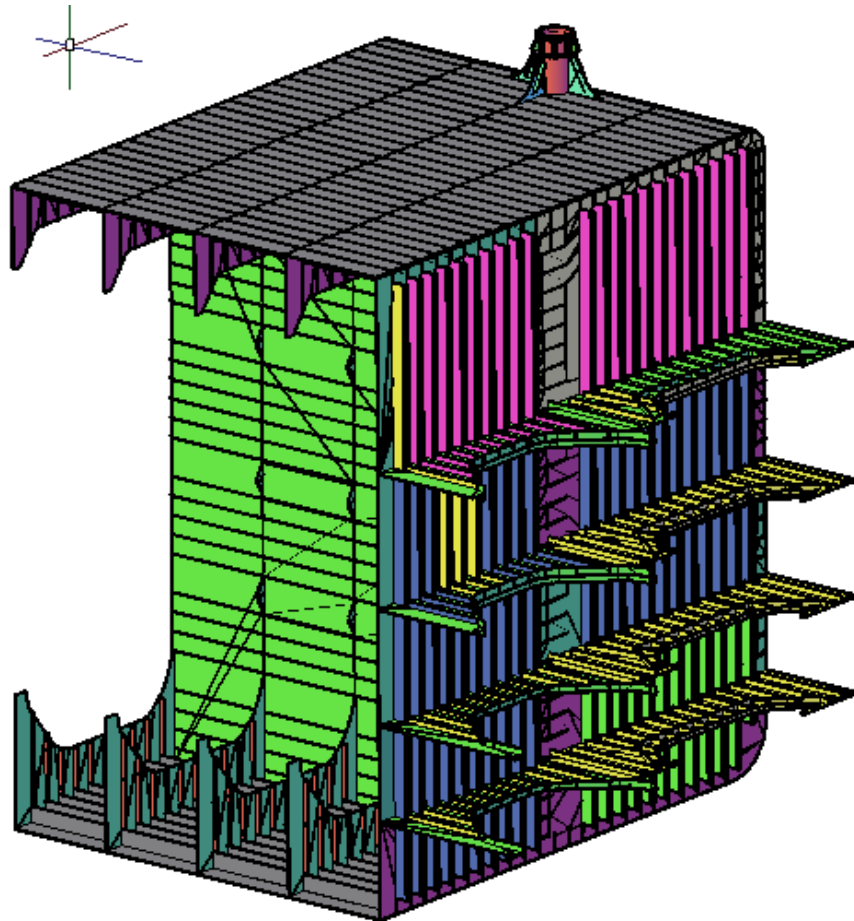
**Gambar 4.60** Foto *existing* konstruksi *bow crane pedestal* pada FSO Arco Ardjuna



**Gambar 4.61** Pemodelan 3D konstruksi *bow crane pedestal* yang terletak di frame 18

#### 4.21 Permodelan Konstruksi Frame 16,17,18,19,20 dan *Bow Crane Pedestal*

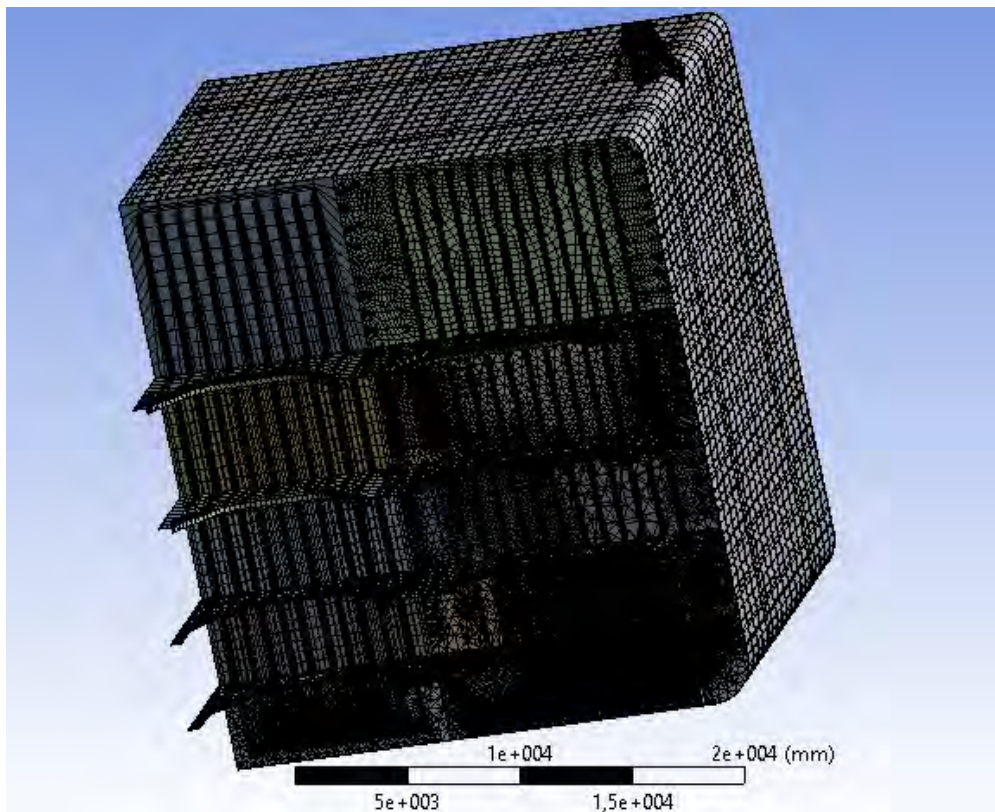
Setelah semua sub-modelling telah dimodelkan maka tahap selanjutnya adalah menyusun keseluruhan sub-modelling menjadi satu kesatuan setengah konstruksi lambung FSO Arco Ardjuna yang meliputi konstruksi frame 16, 17, 18, 19, 20 (bulkhead) dan konstruksi crane pedestal beserta kulit lambung kapal FSO seperti pada Gambar 4.62 di bawah ini



**Gambar 4.62** Pemodelan 3D konstruksi bow crane pedestal yang terletak di frame 18

#### 4.22 Analisis Meshing Sensivity Bow Crane Pedestal

*Sensitivity analysis* perlu dilakukan untuk memastikan bahwa tegangan yg terjadi pada hasil luaran analisis telah benar dan mendekati nilai kebenaran. Dalam tugas akhir ini, uji sensitivitas dilakukan melalui variasi kerapatan dalam *meshing*. Berdasarkan variasi kerapatan *meshing* yang telah diuji, maka didapatkan hasil *maximum principal stress*. Dari beberapa hasil tegangan yang dihasilkan dianalisis dan didapatkan perbedaan hasil kurang dari 5%. Pada tugas akhir ini dilakukan *running* dengan kondisi kerapatan *meshing* seperti pada Gambar 4.63.



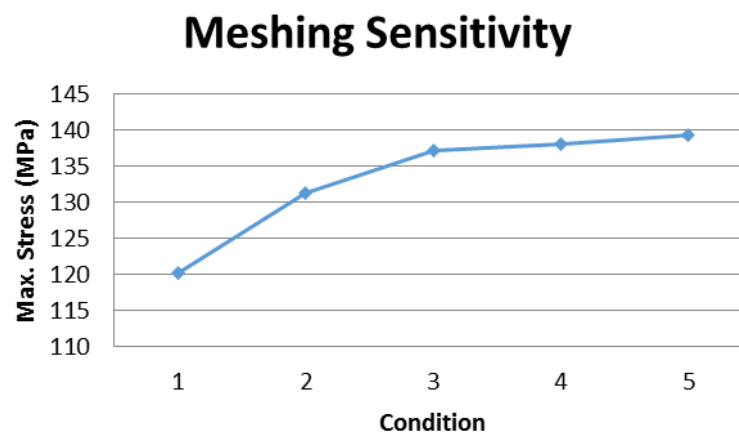
Gambar 4.63 Meshing struktur



Berdasarkan variasi *meshing* yang dilakukan, didapatkan tabulasi *meshing* dan *maximum principal stress* yang dihasilkan pada Tabel 4.15 dan Gambar 4.64 sebagai berikut:

**Tabel 4.15** Tabulasi hasil *Maximum Principal Stress* untuk variasi kerapatan *meshing*

Condition	Mesh Sizing (m)	Max. Stress (Mpa)	Error
1	0,5	120,22	
2	0,45	131,34	0,09
3	0,4	137,16	0,04
4	0,35	138,16	0,01
5	0,3	139,28	0,01



Gambar 4.64 Grafik Sensitivitas meshing model konstruksi lambung FSO Arco Ardjuna dan bow crane pedestal

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas meshing seperti pada Gambar 4.64 di atas dapat disimpulkan bahwa model konstruksi lambung FSO Arco Ardjuna dan *bow crane pedestal* dapat dimodelkan pada ukuran *mesh* 0.4 meter karena hasil perhitungan *error* untuk *mesh* dengan ukuran tersebut kurang dari 5%.

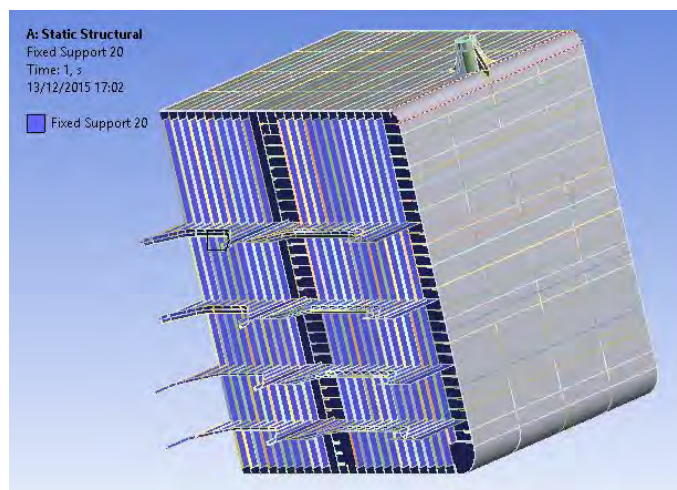
#### 4.23 Batasan Analisis dan Pembebanan pada *Bow Crane Pedestal*

Dalam analisis kelelahan pada konstruksi *bow crane pedestal* diperlukan beberapa konfigurasi pembebanan akibat gerakan FSO dalam kondisi tertambat yang telah dihitung sebelumnya. Selain beban akibat gerakan FSO dalam kondisi tertambat juga diperhitungkan beberapa beban lainnya antara lain, beban berat dari konstruksi lambung dan crane pedestal, beban kekuatan memanjang, *hydrostatic pressure*, dan beban akibat momen angin. Beberapa konfigurasi pembebanan konstruksi pada ANSYS Mechanical untuk menghitung umur kelelahan konstruksi *bow crane pedestal* berdasarkan kekuatan memanjang, kondisi FSO Arco Ardjuna dan *heading* pembebanan antara lain:

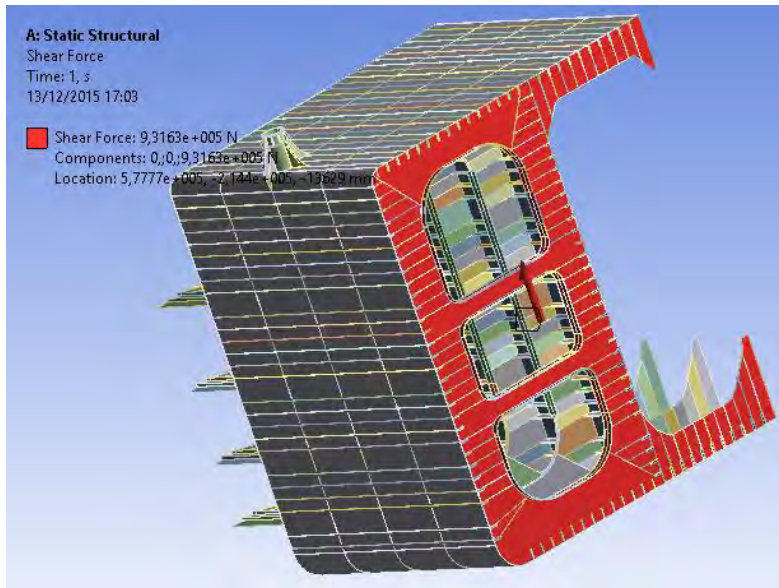
1. Maximum Stress – Light Load – SFBM Sagging Effect – Heading 0°
2. Maximum Stress – Light Load – SFBM Sagging Effect – Heading 90°
3. Maximum Stress – Light Load – SFBM Sagging Effect – Heading 90°
4. Minimum Stress – Light Load – SFBM Sagging Effect – Heading 0°
5. Minimum Stress – Light Load – SFBM Sagging Effect – Heading 90°
6. Minimum Stress – Light Load – SFBM Sagging Effect – Heading 90°
7. Maximum Stress – Light Load – SFBM Sagging Effect – Heading 0°
8. Maximum Stress – Light Load – SFBM Hogging Effect – Heading 90°
9. Maximum Stress – Light Load – SFBM Hogging Effect – Heading 90°
10. Minimum Stress – Light Load – SFBM Hogging Effect – Heading 0°
11. Minimum Stress – Light Load – SFBM Hogging Effect – Heading 90°
12. Minimum Stress – Light Load – SFBM Hogging Effect – Heading 90°
13. Maximum Stress – Full Load – SFBM Sagging Effect – Heading 0°
14. Maximum Stress – Full Load – SFBM Sagging Effect – Heading 90°
15. Maximum Stress – Full Load – SFBM Sagging Effect – Heading 90°
16. Minimum Stress – Full Load – SFBM Sagging Effect – Heading 0°
17. Minimum Stress – Full Load – SFBM Sagging Effect – Heading 90°
18. Minimum Stress – Full Load – SFBM Sagging Effect – Heading 90°
19. Maximum Stress – Full Load – SFBM Hogging Effect – Heading 0°

20. Maximum Stress – Full Load – SFBM Hogging Effect – Heading 90°
21. Maximum Stress – Full Load – SFBM Hogging Effect – Heading 90°
22. Minimum Stress – Full Load – SFBM Hogging Effect – Heading 0°
23. Minimum Stress – Full Load – SFBM Hogging Effect – Heading 90°
24. Minimum Stress – Full Load – SFBM Hogging Effect – Heading 90°

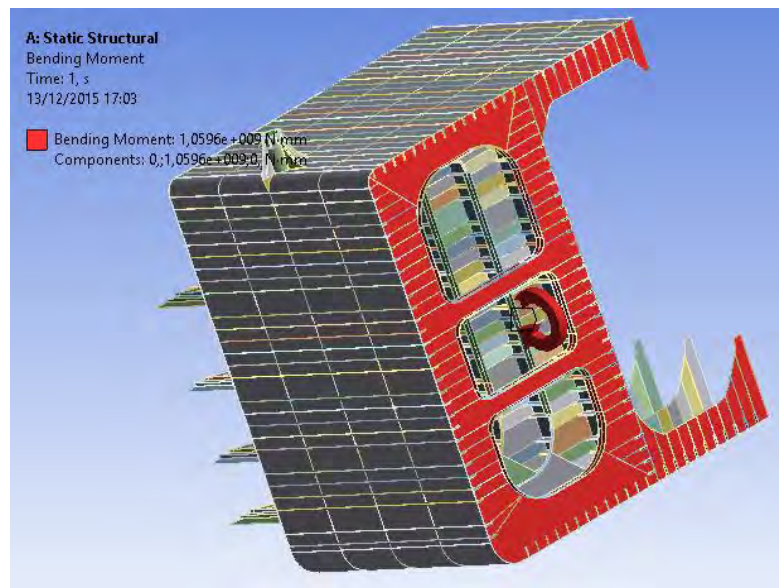
Dalam analisis tegangan diasumsikan bahwa keseluruhan konstruksi merupakan model *cantilever* yang dimana frame 20 diberi tumpuan *fix* sedangkan frame 16 menerima setengah beban kekuatan memanjang kapal (karena pemodelan konstruksi adalah setengah kali lebar dari keseluruhan konstruksi sesungguhnya). Untuk beban struktur diinputkan sama seperti distribusi beban yang juga digunakan dalam perhitungan kekuatan memanjang. Tekanan hidrostatik juga diinputkan sebagai bahan pertimbangan kondisi *light load* dan *full load*. Beban – beban seperti beban gerak *crane* akibat gerakan kapal dan beban akibat momen angin dikenakan pada bagian *crane pedestal face* dengan terlebih dahulu mempertimbangan berat struktur crane. Berikut di bawah ini adalah beberapa ilustrasi pembebanan pada Ansys Mechanical yang ditunjukkan oleh Gambar 4.65 hingga Gambar 4.69



**Gambar 4.65** Tumpuan *fix* pada konstruksi frame 20



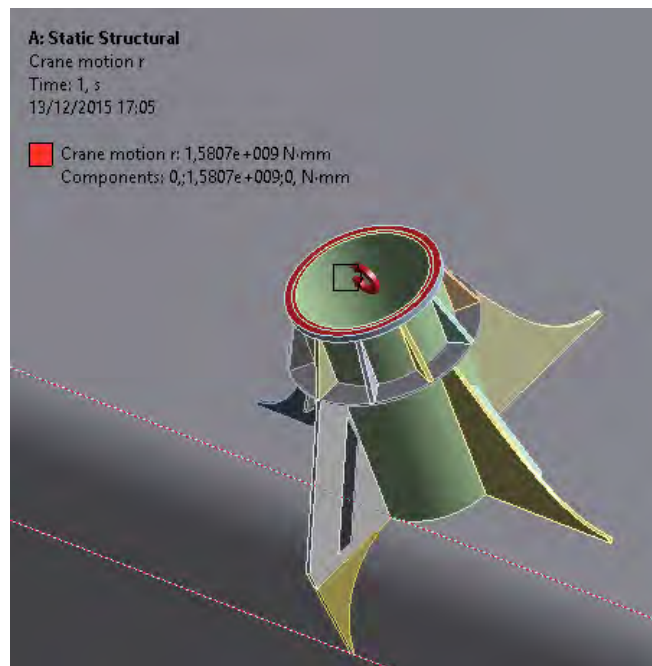
**Gambar 4.66** Pembebanan *Shear Force* pada frame 16



**Gambar 4.67** Pembebanan *Bending Moment* pada frame 16



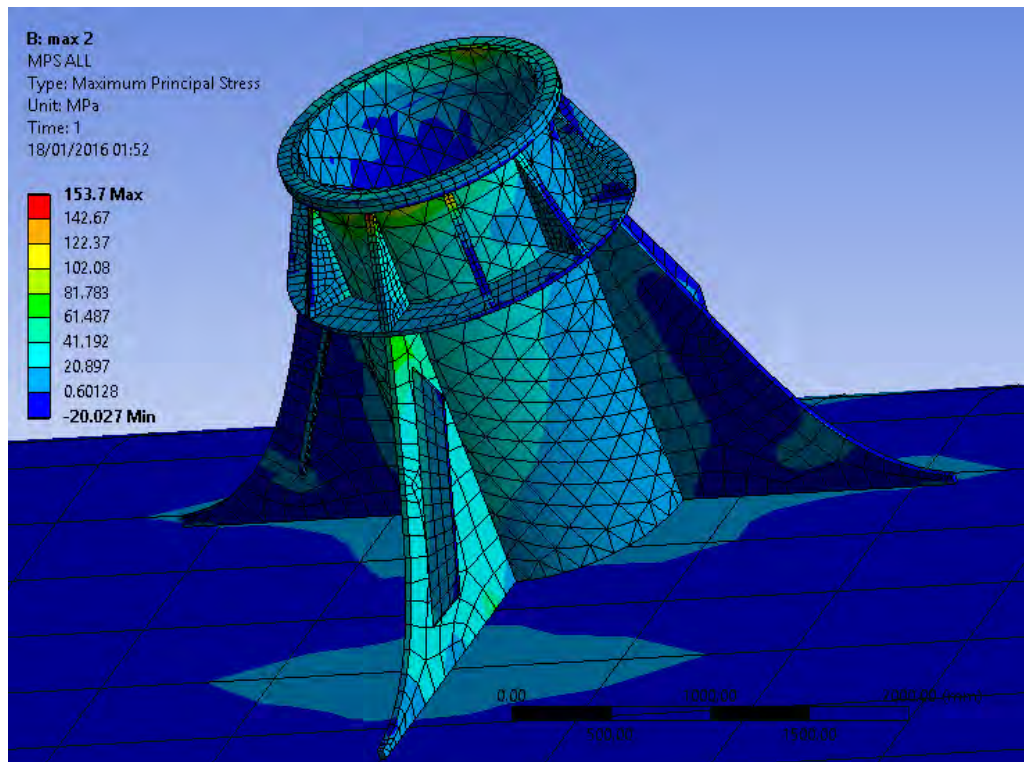
**Gambar 4.68** Pembebanan pada *Crane Pedestal face* akibat gerakan translasi FSO



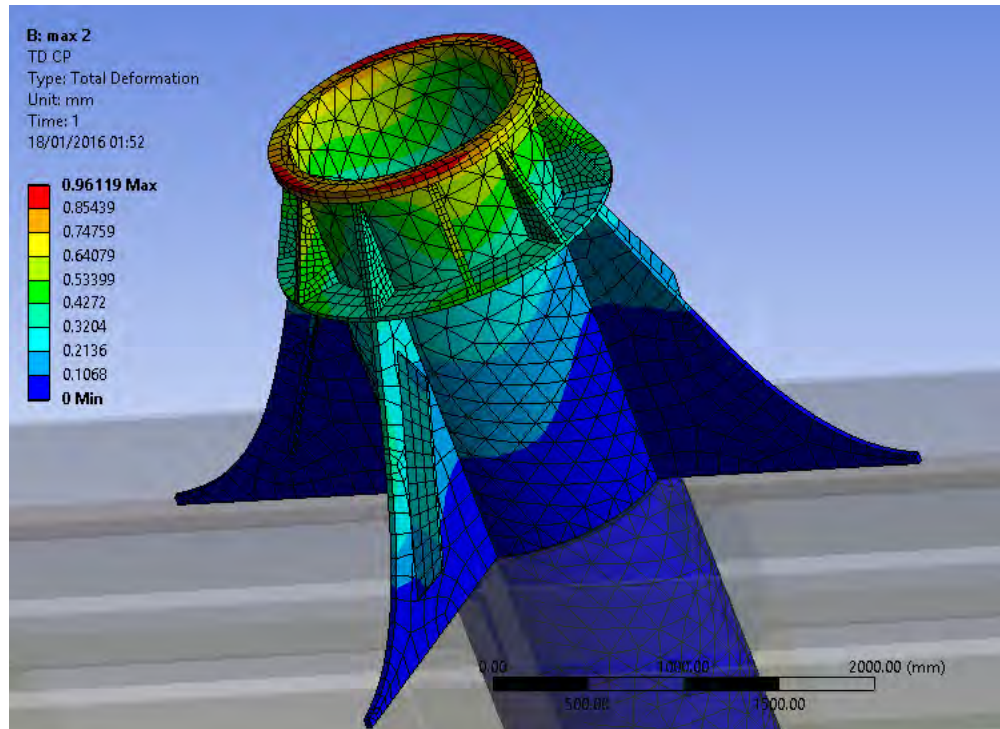
**Gambar 4.69** Pembebanan pada *Crane Pedestal face* akibat gerakan rotasional FSO

#### 4.24 Analisis Tegangan *Bow Crane Pedestal*

Setelah beberapa kombinasi pembebanan dianalisis menggunakan *Static Structural Analysis* Ansys Mechanical maka tegangan dan deformasi yang terjadi akibat setiap masing – masing kondisi pembebanan akan dapat dilihat dan diamati. Dari setiap hasil stress maupun deformasi harus dipastikan bahwa tegangan yang terjadi logis antara stress serta deformasi terhadap beban dan arah pembebanan yang diinputkan, sebagai dasar koreksi apakah model dan inputan beban telah benar dilakukan. Berikut di bawah ini adalah beberapa hasil analisis *maximum principal stress* dan *total deformation* yang terjadi pada konstruksi yang dianalisis ditunjukkan oleh Gambar 4.70 dan Gambar 4.71 (selengkapnya pada Lampiran D).



**Gambar 4.70** Stress yang terjadi pada konstruksi *Crane Pedestal*

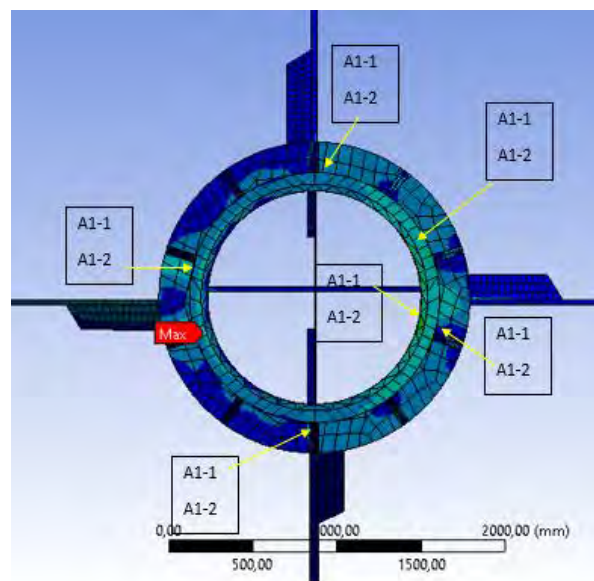


**Gambar 4.71** Deformasi yang terjadi pada konstruksi *Crane Pedestal*

Berdasarkan hasil pemodelan konstruksi lambung FSO dan Crane pedestal pada Gambar 4.71 dan Gambar 4.72 dengan pembebanan sesuai beban akibat gerakan struktur secara translasional maupun rotasional, kekuatan memanjang, tekanan hidrostatis, beban berat struktur, dan beban akibat momen angin didapatkan tegangan maksimum sebesar 129,88 MPa dengan deformasi 0,75 mm. Nilai tegangan maksimum tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan dengan tegangan ijin yang dianjurkan oleh ABS "*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*" sebesar 225 MPa. Dan Nilai deformasi yang dihasilkan juga masih lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum yang tercantum dalam ABS "*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*" yaitu 11.2 mm.

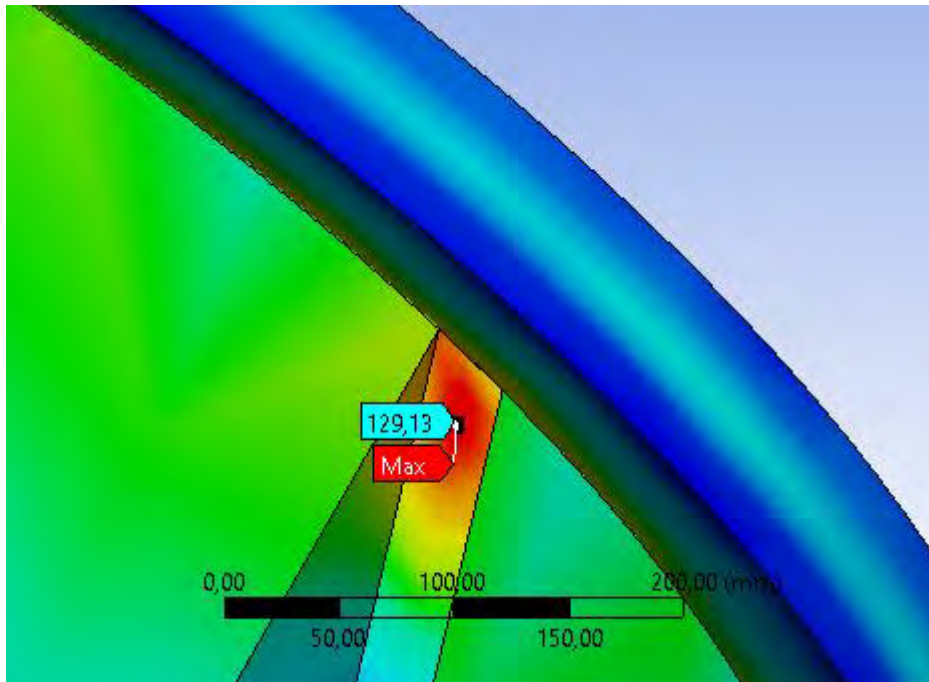
#### 4.21 Analisis Umur Kelelahan *Bow Crane Pedestal*

Perhitungan umur kelelahan dalam tugas akhir ini menggunakan metode S-N Curve berdasarkan hukum kegagalan *palmgren miner (miner's rule)* dengan mengestimasi kumulatif kegagalan *fatigue (cumulative fatigue damage)* menggunakan metode *simplified fatigue analysis*. Berikut adalah tabulasi *maximum principal stress* yang terjadi pada lokasi-lokasi kritis pada konstruksi *crane pedestal* yang nantinya digunakan dalam perhitungan umur kelelahan. Penomoran titik-titik kritis pada konstruksi *crane pedestal* dapat dilihat pada Gambar 4.72 dan Gambar 4.73 berikut



**Gambar 4.72** Penomoran titik-titik kritis pada struktur Konstruksi Crane Pedestal





**Gambar 4.73** Konstruksi Kritis

Tabel 4.16 dan Tabel 4.17 di bawah ini menjelaskan perhitungan *hot-spot stress* dengan menggunakan faktor 1.12 (Selengkapnya pada Lampiran E)

**Tabel 4.16** Perhitungan *Hot-Spot Stress*

LC-1				LC-4			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]	Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	105,450	1,120	118,104	A1-1	18,308	1,120	20,505
A1-2	101,070	1,120	113,198	A1-2	17,719	1,120	19,845
A2-1	57,224	1,120	64,091	A2-1	1,226	1,120	1,373
A2-2	56,556	1,120	63,343	A2-2	1,585	1,120	1,775
A3-1	39,449	1,120	44,183	A3-1	5,298	1,120	5,934
A3-2	40,617	1,120	45,491	A3-2	6,882	1,120	7,708
A4-1	59,721	1,120	66,888	A4-1	14,551	1,120	16,297
A4-2	55,794	1,120	62,489	A4-2	13,520	1,120	15,142
A5-1	46,554	1,120	52,140	A5-1	4,571	1,120	5,120
A5-2	45,149	1,120	50,567	A5-2	4,075	1,120	4,564
A6-1	42,954	1,120	48,108	A6-1	2,662	1,120	2,981
A6-2	43,726	1,120	48,973	A6-2	4,542	1,120	5,087

Tabel 4.17 Perhitungan *Hot-Spot Stress Range*

LC-1 / LC-4			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	118,104	20,505	97,599
A1-2	113,198	19,845	93,353
A2-1	64,091	1,373	62,718
A2-2	63,343	1,775	61,568
A3-1	44,183	5,934	38,249
A3-2	45,491	7,708	37,783
A4-1	66,888	16,297	50,590
A4-2	62,489	15,142	47,347
A5-1	52,140	5,120	47,021
A5-2	50,567	4,564	46,003
A6-1	48,108	2,981	45,127
A6-2	48,973	5,087	43,886

$f_o$	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9,46E+08 second	
L	=	16,26 m	
	=	$\frac{f_o U}{4 \log L}$	
$N_1$	=	1,95E+08	
Hot-spot SN-curve parameters (Class D):			
m	=	3	
$\Delta m$	=	2	
$K_1$	=	1,52E+12	
$S_o$	=	53,4 N/mm <sup>2</sup>	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
$\alpha$	=	0,83	
$\xi$	=	1,075109	
$V_1$	=	$\left(\frac{S_o}{S_w}\right)^m \ln N_o$	4,82
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		3,79
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		5,65
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		4,64
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_1\right)$	=		3,45059
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_1\right)$	=		27,42067
$v_1^{-1m/\xi}$	=		0,05370

Dalam analisis ini menggunakan metode simplified fatigue analysis, yang dinyatakan sebagai berikut

$$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma \left( 1 + \frac{m}{\xi} \right)$$

DM = 1,74E-01

Berikut Tabel 4.18 dan Tabel 4.19 di bawah ini adalah perhitungan umur kelelahan konstruksi crane pedestal yang disajikan dalam bentuk tabulasi

**Tabel 4.18** Perhitungan umur kelelahan konstruksi crane pedestal dalam kondisi light load

Damage	Operation factor	Light Load											
		A1-1	A1-2	A2-1	A2-2	A3-1	A3-2	A4-1	A4-2	A5-1	A5-2	A6-1	A6-2
B1	0.14	6.48E-01	6.12E-01	1.03E-01	9.40E-02	9.04E-03	8.50E-03	3.62E-02	2.61E-02	2.53E-02	2.27E-02	2.06E-02	1.79E-02
B2	0.14	1.59E-02	1.81E-02	9.59E-01	9.83E-01	6.88E-03	5.62E-03	7.84E-03	7.09E-03	1.08E-01	6.56E-02	2.31E-02	1.64E-02
B3	0.14	4.01E-01	4.67E-01	3.15E-02	1.98E-02	1.97E-05	1.50E-05	8.43E-02	9.66E-02	2.79E-02	2.31E-02	3.07E-02	3.08E-02
B4	0.14	1.10E-01	9.67E-02	2.23E-02	1.94E-02	7.51E-03	5.84E-03	4.25E-04	7.77E-04	2.03E-02	1.66E-02	1.58E-02	1.15E-02
B5	0.14	4.79E-01	5.47E-01	1.49E+00	1.42E+00	2.84E-03	3.50E-03	6.05E-03	5.81E-03	1.52E-01	1.36E-01	4.71E-02	4.36E-02
B6	0.14	7.71E-02	7.27E-02	7.43E-02	7.74E-02	6.53E-03	4.43E-03	8.68E-02	7.27E-02	5.93E-02	5.09E-02	4.10E-02	3.71E-02
Total Damage Ratio		2.47E-01	2.59E-01	3.83E-01	3.73E-01	4.69E-03	3.99E-03	3.17E-02	2.99E-02	5.62E-02	4.50E-02	2.55E-02	2.25E-02
Fatigue Life (years)		121.386	115.8171	78.3908	80.39142	6397.696	7522.07	947.6086	1004.264	534.0329	666.7731	1178.05	1334.666
Minimum Fatigue Life (years)		78.3908											

**Tabel 4.19** Perhitungan umur kelelahan konstruksi crane pedestal dalam kondisi full load

Damage	Operation factor	Full Load											
		A1-1	A1-2	A2-1	A2-2	A3-1	A3-2	A4-1	A4-2	A5-1	A5-2	A6-1	A6-2
B7	0.14	4.23E-04	1.01E-04	6.21E-03	3.57E-03	1.66E-04	1.48E-05	4.02E-07	9.10E-07	7.23E-06	2.26E-05	2.02E-05	1.14E-05
B8	0.14	5.22E-05	6.42E-06	7.38E-02	5.31E-04	1.33E-04	1.19E-04	4.65E-05	3.04E-04	1.73E-02	7.17E-03	5.50E-04	1.04E-03
B9	0.14	4.58E-03	8.48E-04	6.16E-04	2.83E-06	6.76E-09	1.97E-06	1.77E-04	1.82E-04	6.97E-06	5.11E-06	1.78E-06	2.63E-06
B10	0.14	3.51E-03	2.00E-03	3.35E-04	2.85E-05	7.58E-09	4.42E-05	2.49E-04	5.47E-05	1.39E-05	9.14E-07	6.21E-06	4.08E-06
B11	0.14	2.64E-04	4.60E-05	4.84E-02	1.99E-02	3.50E-05	6.99E-05	1.12E-06	1.16E-04	5.93E-03	5.75E-03	2.74E-05	1.29E-04
B12	0.14	6.28E-03	8.74E-03	2.38E-04	7.92E-05	1.00E-08	4.83E-05	3.65E-04	7.10E-05	8.67E-06	4.89E-06	6.29E-05	8.15E-05
Total Damage Ratio		2.16E-03	1.68E-03	1.85E-02	3.44E-03	4.78E-05	4.26E-05	1.20E-04	1.04E-04	3.33E-03	1.85E-03	9.55E-05	1.82E-04
Fatigue Life (years)		13901.09	17890.68	1620.574	8709.688	627761.9	704908.8	250318.7	287794.5	9008.822	16214.79	314019.5	165047.3
Minimum Fatigue Life (years)		1620.574											

Dari hasil perhitungan umur kelelahan konstruksi crane pedestal FSO Arco Ardjuna pada Tabel 4.18 dan Tabel 4.19 diperoleh hasil bahwa konstruksi crane pedestal memiliki harga  $D < 1$  sehingga struktur tersebut dapat dikatakan aman digunakan dalam kondisi operasi dengan umur kelelahan sepanjang 78,4 tahun.

*(halaman ini sengaja di kosongkan)*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dibuat berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

1. RAO FSO Arco Ardjuna pada saat *mooring*, adalah sebagai berikut :, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.9 m/m, *sway* terbesar 0,4 m/m, *heave* terbesar 0,4 m/m, *roll* terbesar 1,2 <sup>0</sup>/m, *pitch* terbesar 0,9 <sup>0</sup>/m, *yaw* terbesar 0.001 <sup>0</sup>/m. Hasil perhitungan kekuatan memanjang menunjukkan bahwa *shear force* dan *bending moment* pada frame 16 terbesar terjadi akibat efek *hogging* masing – masing sebesar 48,74 dan 38,63 ton.m. Untuk beban crane yang dipengaruhi motion FSO secara translasi dan rotasional terjadi terbesar pada kondisi light load, gerakan surge yang terjadi akibat pembebanan arah 180 <sup>0</sup> mengakibatkan beban translasi sebesar 35,5 kN sementara gerakan sway akibat arah pembebanan gelombang 90 <sup>0</sup> mengakibatkan beban translasi sebesar 51,58 kN, sedangkan beban torsional yang terjadi akibat gerakan FSO terbesar diakibatkan gerakan roll akibat arah pembebanan 90 <sup>0</sup> dan gerakan pitch akibat arah pembebanan 180 <sup>0</sup> yang masing – masing sebesar 2051,7 kN.m dan 2026,2 kN.m. Dikarenakan dalam kondisi light load ketinggian struktur crane yang terpancang pada crane pedestal di atas geladak dapat mencapai ketinggian di atas 20 m maka beban akibat momen angin sangat berpengaruh, maka dalam perhitungan beban momen angin terhadap konstruksi *crane pedestal* di dapatkan beban momen angin sebesar 157,918 N.m.
2. Berdasarkan hasil pemodelan struktur lokal *crane pedestal* dan *hull structure* frame 16,17,18,19 dan 20 dengan pembebanan akibat kekuatan

memanjang kapal, gerakan FSO dalam kondisi tertambat, tekanan hidrostatik, beban berat struktur, dan beban momen angin didapatkan tegangan maksimum sebesar 153,7 MPa dengan deformasi 0,96 mm. Nilai tegangan maksimum tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan dengan tegangan ijin yang dianjurkan oleh ABS "Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems" sebesar 225 MPa. Dan Nilai deformasi yang dihasilkan juga masih lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum yang tercantum dalam ABS "Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction" yaitu 11.2 mm. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa konstruksi *crane pedestal* aman untuk beroperasi.

3. Dari hasil perhitungan umur kelelahan struktur, diperoleh hasil bahwa konstruksi *bow crane pedestal* memiliki harga  $D < 1$  sehingga struktur tersebut dapat dikatakan aman untuk melakukan proses operasi dengan prediksi umur kelelahan konstruksi sepanjang 78,4 tahun.

## 5.2 Saran

1. Untuk analisis lebih spesifik dalam penentuan umur kelelahan konstruksi *crane pedestal* perlu adanya analisis gerakan FSO dalam keadaan tertambat pada *single point mooring* berbasis beban gelombang irregular.
2. Dalam analisis tugas akhir ini, penulis hanya menganalisis pembebanan berdasarkan 3 arah pembebanan,  $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ , dan  $180^{\circ}$  maka untuk tujuan ketelitian dalam pengembangan analisis dapat dilakukan analisis berdasarkan arah pembebanan dari sudut datang gelombang yang lain.
3. Dikarenakan keterbatasan teknologi yang dialami penulis sehingga permodelan *hull structure* hanya setengah bagian melintang, maka perlu adanya analisis tegangan dengan menganalisis seluruh bagian melintang

sepanjang lebar maksimum 48,2 m untuk mendapatkan hasil sebaran tegangan yang lebih akurat.

4. Untuk pengembangan analisis lanjutan dapat pula dimodelkan *crane boom* untuk menambah variasi pembebanan dengan memperhatikan faktor panjang lengan *boom* dan historis pengangkatan muatan menggunakan *crane* dalam masa operasi *crane*.
5. Dalam kasus tugas akhir ini ketebalan konstruksi *hull structure* yang digunakan dalam permodelan dan analisis adalah 80% dari ketebalan elemen asli, oleh sebab itu analisis dapat dikembangkan dengan memvariasikan ketebalan elemen konstruksi sebagai akibat pengaruh korosi sepanjang umur operasi FSO Arco Ardjuna yang dapat mempengaruhi hasil sebaran tegangan dan umur kelelahan.
6. Dalam analisis sejenis, analisis sensitivitas *meshing* harus sedemikian rupa dilakukan untuk memastikan setiap *3D element node* tersambung satu sama lain untuk memperkecil peluang *error* yang terjadi dalam *computational finite element method analysis* guna mendapatkan hasil luaran tegangan yang logis secara besaran maupun vektor terhadap beban yang diinputkan ke dalam model analisis.
7. Pengujian sebaran tegangan menggunakan berbasis *computational finite element method analysis* dapat diuji dengan menggunakan bantuan software lain selain yang telah digunakan penulis (Ansys Static Structural), semisal MSC Nastran + Patran atau Siemens Femap dan sebagainya, untuk menguji keakuratan hasil luaran tegangan terhadap inputan beban.
8. Perlu adanya pengujian umur kelelahan dengan menggunakan metode – metode lain, semisal metode *spectral based damage method* untuk mendapatkan prediksi umur kelelahan konstruksi yang lebih akurat.

*(halaman ini sengaja di kosongkan)*



## Daftar Pustaka

- ABS, 1996, *Rules for Building and Classing Single Point Moorings*, USA: American Bureau of Shipping.
- ABS, 2001, '*Safehull-Dynamic Loading Approach*' for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Installations, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- ABS, 2004, *Guide For Building and Classing Floating Production Installations*, USA: American Bureau of Shipping.
- ABS, 2001, '*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*', USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- API RP 2SK 3<sup>th</sup> edition, 2005, *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*, Washington DC.
- API RP 2A Working Stress Design, 2000, *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform*, Washington DC.
- API RP 2D, 1999, *Recommended Practice for Operation and Maintenance of Offshore Cranes*, Washington DC.
- API Specification 2C, 1999, *Specification for Offshore Cranes*, Washington DC.
- Bhattacharyya. R., 1978, *Dynamics of Marine Vehicles*, New York: John Wiley & Sons Inc.
- Chakrabarti, S.K., 1987, *Hydrodynamics of Offshore Structures*, USA: Computational Mechanics Publications Southampton.

- De Pee, A., (2005), *Operability of a Floating LNG Terminal*, TU Delft, Shell Global Solutions.
- Dawson, Thomas H., 1983, *Offshore Structural Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Djarmiko, E. B. and Murdijanto, 2003, *Seakeeping: Perilaku Bangunan Apung di atas Gelombang*, Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- DNV (2010), *Environmental Conditions and Environmental Loads*, Det Norske Veritas, Norway
- DNV-OSS-102, 2003, *Rules for Classification of Floating Production and Storage Units*, Norway: Det Norske Veritas.
- DNV Recommended Practice C203, 2008, *Fatigue Design of Offshore Steel Structure*, Norway: Det Norske Veritas.
- DNV Recommended Practice C206, 2006, *Fatigue Methodology of Offshore Ships*, Norway: Det Norske Veritas.
- JKurnianto, Pradetya., 2010, *Perkiraan Umur Konstruksi FPSO Konversi dari Tanker dengan Analisa Fatigue*, Surabaya : Tugas Akhir Jurusan Teknik Perkapalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Murtedjo, Mas., 1999, *Handout Teori Bangunan Apung*, Surabaya: ITS.
- Naess, A., 1985, *Fatigue Handbook Offshore Steel Structure*, Trondheim.

- Peurifoy, R. L, 1996, *Construction Planning, Equipment, and Methods 5<sup>th</sup> Edition*, The McGraw-Hill Companies, New York.
- Olson, S.R. (1977), *A Methodology for Quantifying the Operational Effects of Ship Seakeeping Characteristics*, Center for Naval Analyses, Virginia.
- Soedjono, J. J., 1989, *Kuliah Perencanaan Sistem Bangunan Laut I*, Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan.
- Taggart, Robert., 1980, *Ship Design and Construction*, New York: The Society of Naval Architecture and Marine Engineers.
- Watson, David D.G.M.,1998, *Practical Ship Design*, UK: Elsevier Science Ltd.
- Witz, J. A.,1995, *Parametric Excitation of Crane Loads in Moderate Sea States*, Ocean Engineering, Vol. 22, pp.4:411-420.

**LAMPIRAN A**  
**DATA STRUKTUR FSO ARCO ARDJUNA**  
**DAN *SINGLE POINT MOORING***











FOR APPROVAL

NO.	REVISION	DATE	BY	CHKD.	APPROVED
1	ISSUED FOR APPROVAL	2024-05-18	...	...	...
2	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...
5	...	...	...	...	...

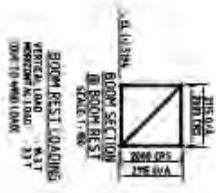
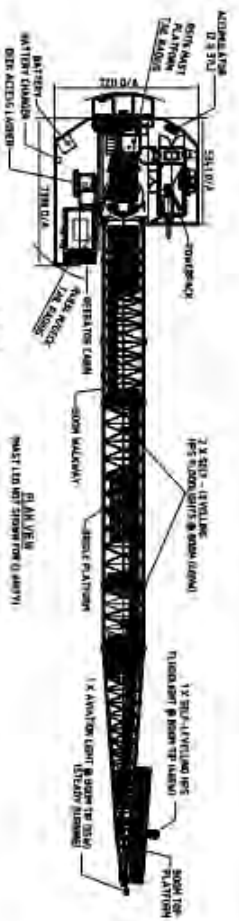
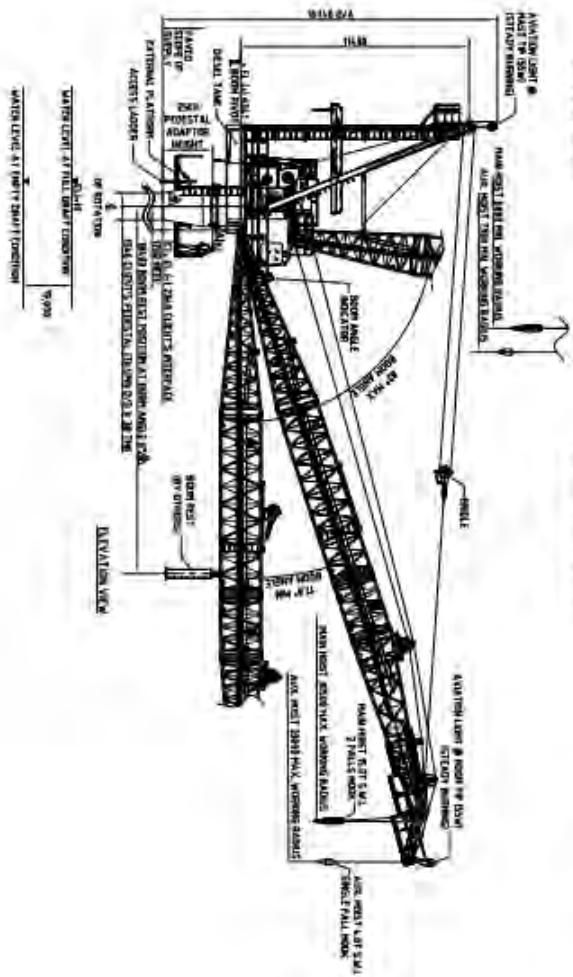
PROJECT NAME: ...



GENERAL ARRANGEMENT

Scale: 1:100

VENDOR DRAWING NO.: W1000-0518-X00 PAGE: 1 OF 2





S/N 271A (6/10K) - 30.5m BOOM  
 MAIN HOIST 2 FALLS / AUX. HOIST 1 FALL  
 / BOOM HOIST 8 FALLS  
 FSO ARCO ARJUNA  
 TAG NO : AA-FWD-CR

BOOM ANGLE (°)	RADIUS (m)	S.W.L (IN TONNES)							
		S.W.H. 1.0m		S.W.H. 1.5m		S.W.H. 2.0m		S.W.H. 2.5m	
		ONBOARD	OFFBOARD	ONBOARD	OFFBOARD	ONBOARD	OFFBOARD	ONBOARD	OFFBOARD
87.0	6.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
76.1	6.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
74.2	10.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	16.8
70.3	12.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	11.8
66.2	14.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	12.7	15.0	9.6
64.1	15.0	15.0	15.0	14.8	15.0	13.5	11.5	15.0	8.7
62.0	16.0	15.0	15.0	13.5	13.5	10.5	10.5	15.0	7.9
57.6	18.0	15.0	14.4	11.5	11.5	8.8	8.8	15.0	6.6
53.0	20.0	15.0	12.4	14.8	9.8	14.1	7.5	13.4	5.6
48.1	22.0	13.4	10.8	12.9	8.5	12.4	6.5	11.8	4.8
42.8	24.0	11.8	9.5	11.3	7.5	10.9	5.7	10.4	4.1
36.8	26.0	10.3	8.4	10.0	6.6	9.6	5.0	9.2	3.7
29.8	28.0	9.1	7.6	8.9	6.0	8.6	4.6	8.2	3.3
20.7	30.0	8.1	7.0	7.9	5.6	7.7	4.3	7.4	3.1
11.8	30.5	7.9	6.9	7.7	5.5	7.5	4.1	7.3	3.0

AVG HOIST 4.0T @ ALL RADII (MIN 1.3m - MAX 33.0m)  
 PERSONNEL LIFT 1.0 T @ ALL RADII  
 API 2C MINIMUM RECOMMENDED HOIST SPEED: 15.1 m/min  
 MAXIMUM OPERATING WIND SPEED: 16.0 m/s (56 kph)  
 RATING METHOD: GENERAL METHOD  
 ≤ 5° LIST ANGLE CONDITION

LOADING & SLINGING (L)  
 PROMPT WIND ASSEMBLY : 82.7 T  
 HOIST ASSEMBLY : 73.7 T  
 BOOM ASSEMBLY : 80.7 T  
 MAIN ASSEMBLY : 64.1 T  
 PAY OFF ASSEMBLY : 62.7 T  
 BEAMS WEIGHTS : 22.1 T  
 TOTAL CRANE WEIGHTS (PRT) : 575.1 T  
 TOTAL CRANE WEIGHTS (OPERATION) (PRT) :

LOADING & SLEWING (L)  
 MAX DYNAMIC WIND : 48Kts (9m)  
 CORRESPONDING WIND LOAD : 15.3 T  
 MAX WIND LOAD : 15.3 T  
 MAX WIND WAVE : 15.3 T  
 LOADS & PEDESTAL LOADS (L)  
 CATEGORY 2 DESIGN LOADS : 15.0 T  
 IN ACCORDANCE WITH API-C2  
 CORRESPONDING WIND LOAD : 15.3 T  
 MAX ASIAL LOAD : 15.3 T

LOADING & SLEWING (L)  
 WINDS (m)  
 48Kts (9m)  
 15.3 T  
 15.3 T  
 15.3 T  
 CORRESPONDING (DYNAMIC) WINDS : 15.3 T

LOADING & SLEWING (L)  
 INCLUDES PEDESTAL FACTOR 15. CATEGORY 1 OR CATEGORY 2  
 DESIGN LOAD IN ACCORDANCE WITH API-C2  
 WIND DYNAMIC WIND LOAD : 15.3 T  
 MAX ASIAL LOAD : 15.3 T  
 CORRESPONDING (DYNAMIC) WINDS : 15.3 T

GENERAL DATA  
 AREA CLASSIFICATION : CRANE IN SAFE AREA  
 MAIN HOIST : 80 T (9m) - 2 FALLS  
 AUX. HOIST : 10 T (9m) - 1 FALL  
 BOOM HOIST : 8 T (9m) - 1 FALL  
 SPEED : 15.1 m/min  
 LIFTING : MAX RADIUS TO MIN RADIUS  
 IN 10 MIN APPROX.  
 SLEWING : 6-10 MIN  
 PAY OFF : 20 T (9m)  
 PAY OFF : 20 T (9m)  
 PAY OFF : 20 T (9m)  
 PAY OFF : 20 T (9m)  
 PAY OFF : 20 T (9m)

NOTES  
 1. THIS CRANE IS BUILT IN ACCORDANCE WITH API-C2 17TH EDITION.  
 2. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETRES UNLESS SPECIFIED OTHERWISE.  
 3. RATED LOAD IS IN METRIC TONNES AND REFERS TO LEAF BEHIND THE HOIST.  
 4. MAXIMUM HOIST IS BEHIND SWAYLE FALL.  
 5. ALL ASIAL LOADS AT PEDESTAL INTERFACES SHALL INCLUDE WEIGHT OF THE PEDESTAL ASSEMBLY.  
 6. ALL ASIAL LOADS AT PEDESTAL INTERFACES SHALL INCLUDE WEIGHT OF THE PEDESTAL ASSEMBLY.  
 7. DESIGN BEST LIFTING & LANDING AT LEVEL (L) IN ALL CASES SHOULD HAVE 5% VARIANCE.  
 8. WIND WAVE LENGTH PROVIDED IS SUFFICIENT FOR WIND TO REACH EMPTY LOAD CONDITION WHICH IS TRANSMITTING IN FOLLOWING CONDITION.

FOR APPROVAL

DATE	BY	CHECKED	APPROVED	SIGNATURE

PT BINA BANGSA

PT BINA BANGSA

PT BINA BANGSA

**GENERAL ARRANGEMENT**

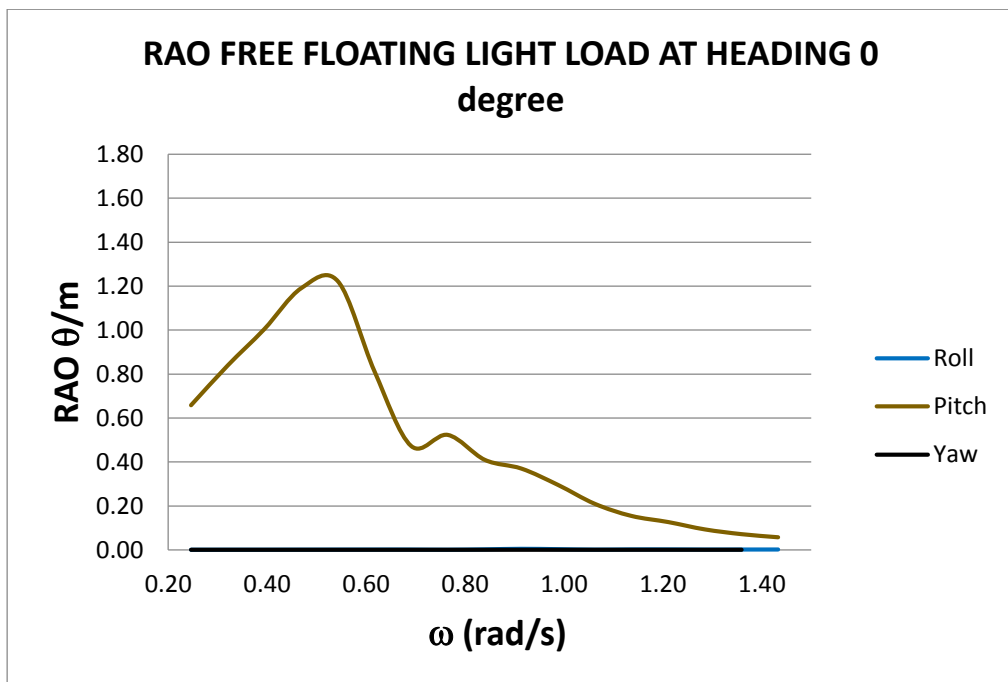
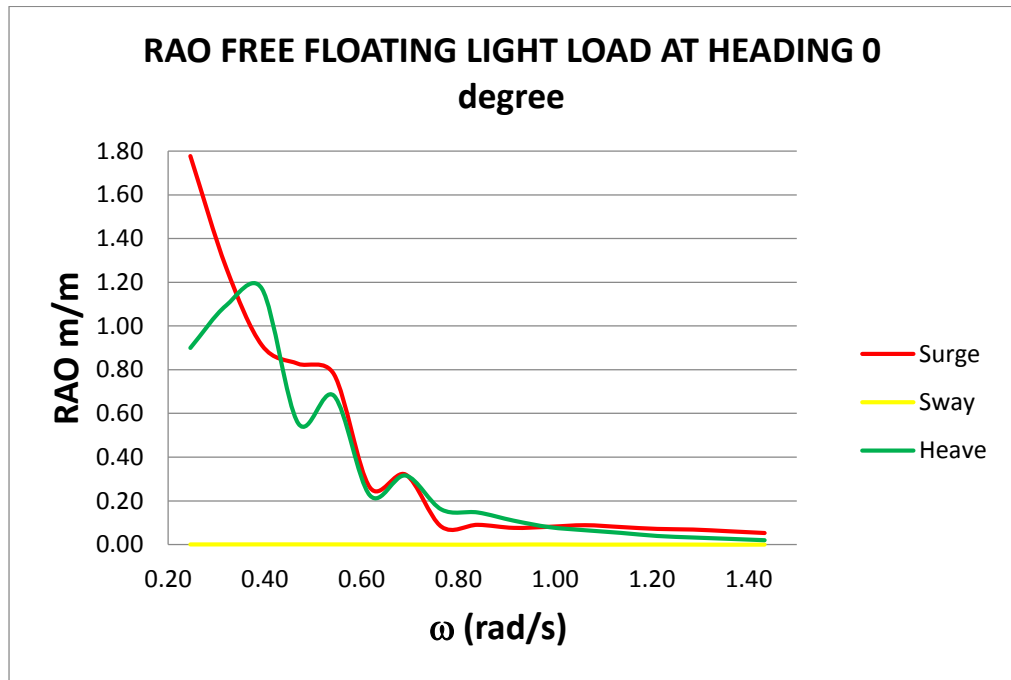
PT BINA BANGSA



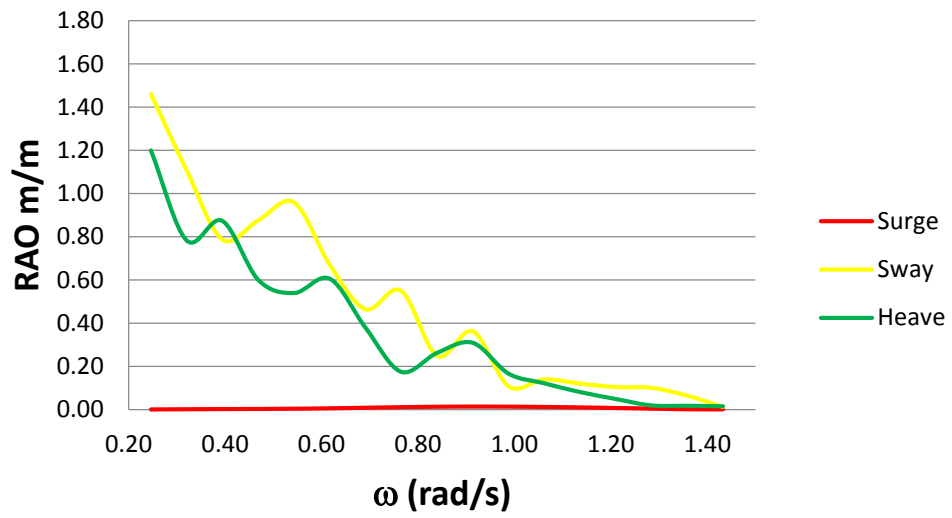
**LAMPIRAN B**  
**RAO *FREE FLOATING* DAN TERTAMBAT**  
**FSO ARCO ARDJUNA DAN *SINGLE***  
***POINT MOORING***



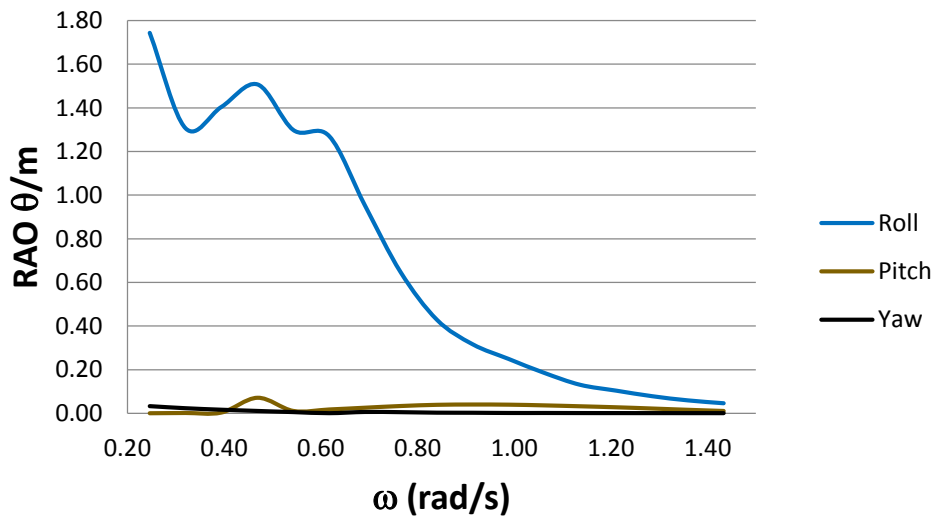
RAO FSO Arco Ardjuna kondisi free floating dan tertambat

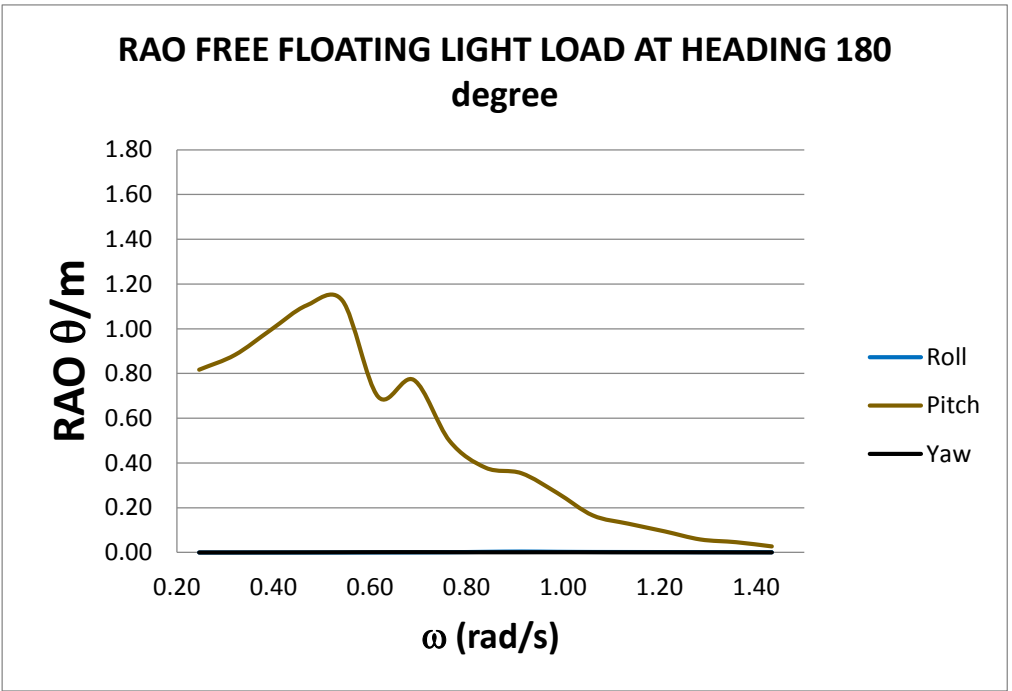
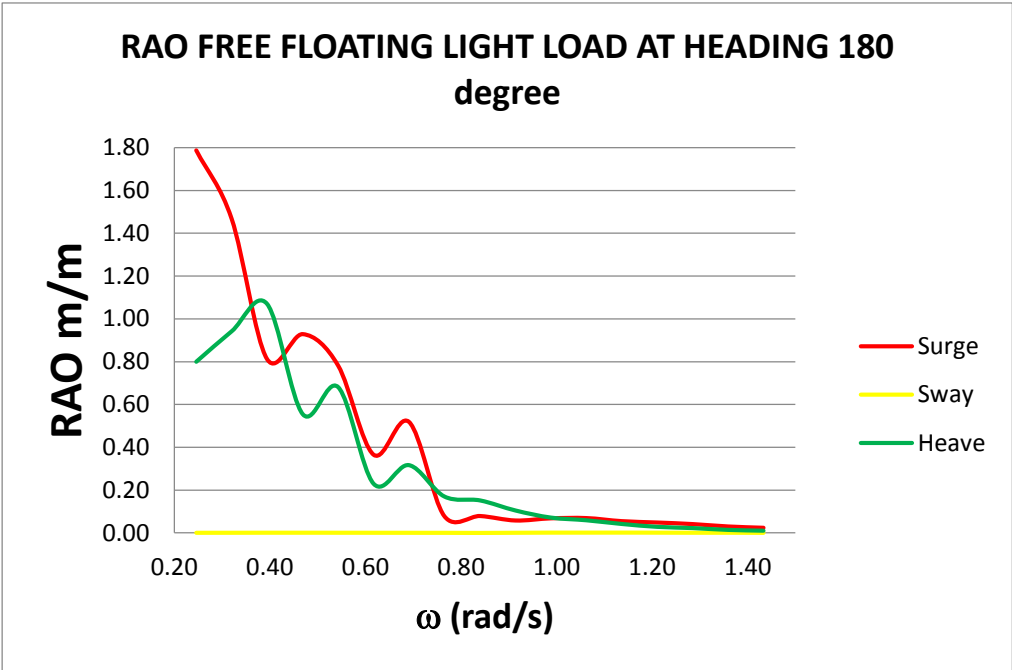


**RAO FREE FLOATING LIGHT LOAD AT HEADING 90 degree**



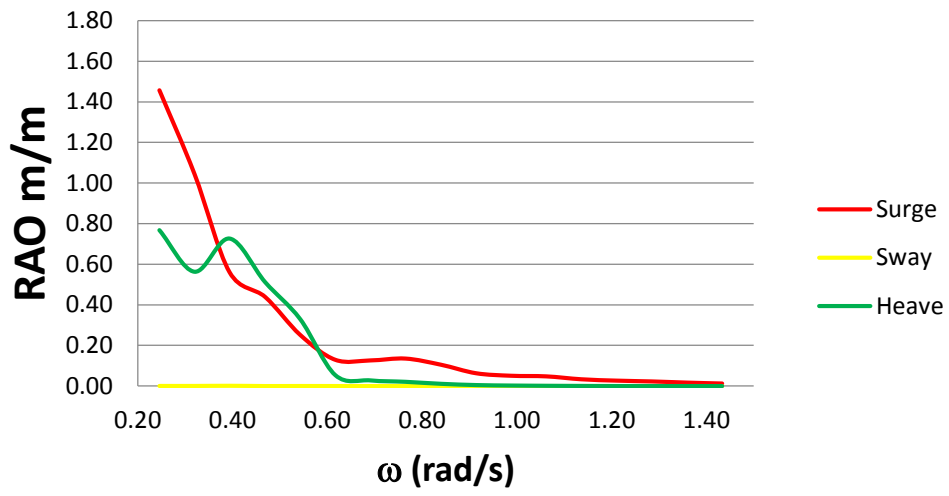
**RAO FREE FLOATING LIGHT LOAD AT HEADING 90 degree**



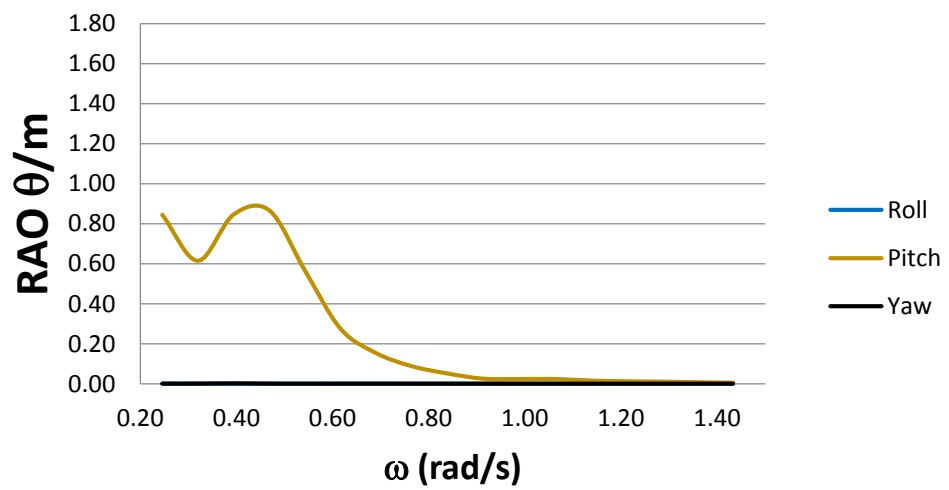


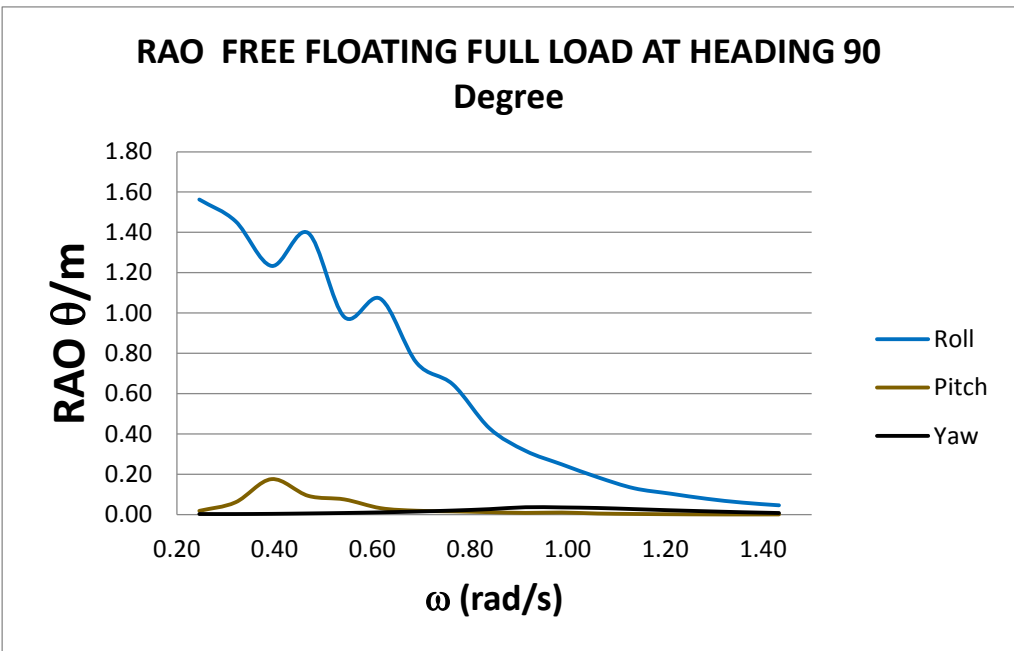
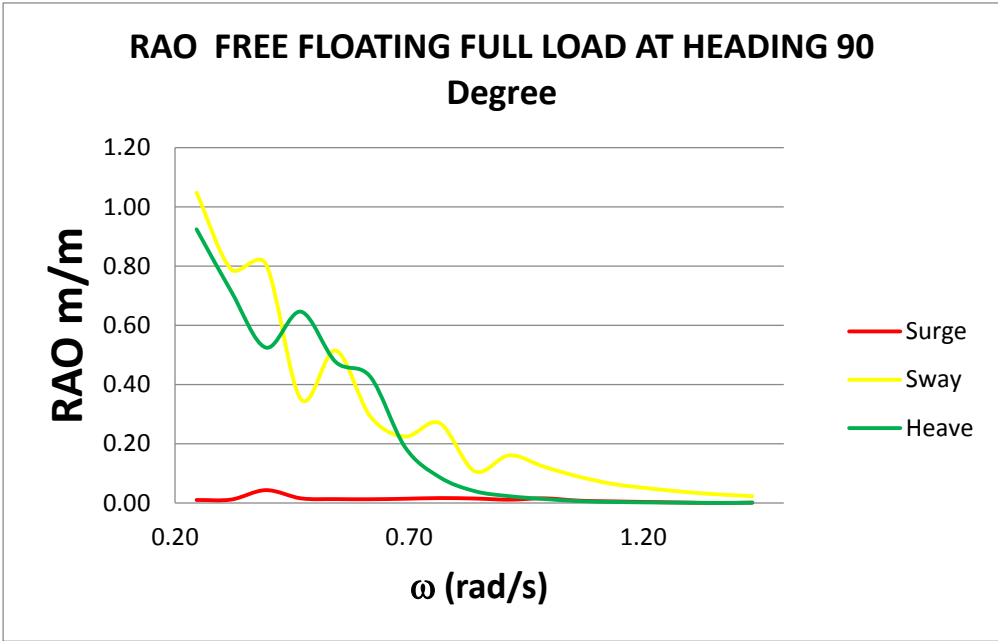


**RAO FREE FLOATING FULL LOAD AT HEADING 0 degree**

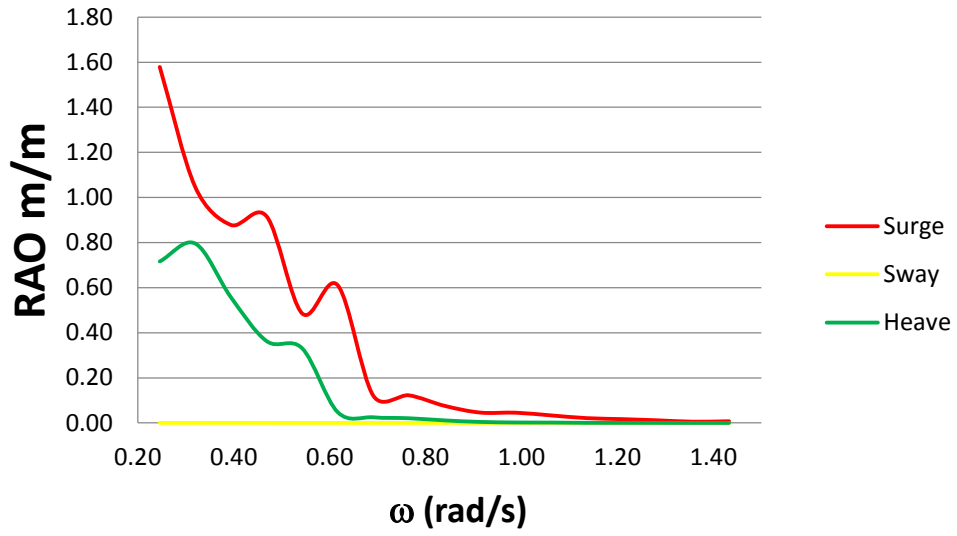


**RAO FREE FLOATING FULL LOAD AT HEADING 0 degree**

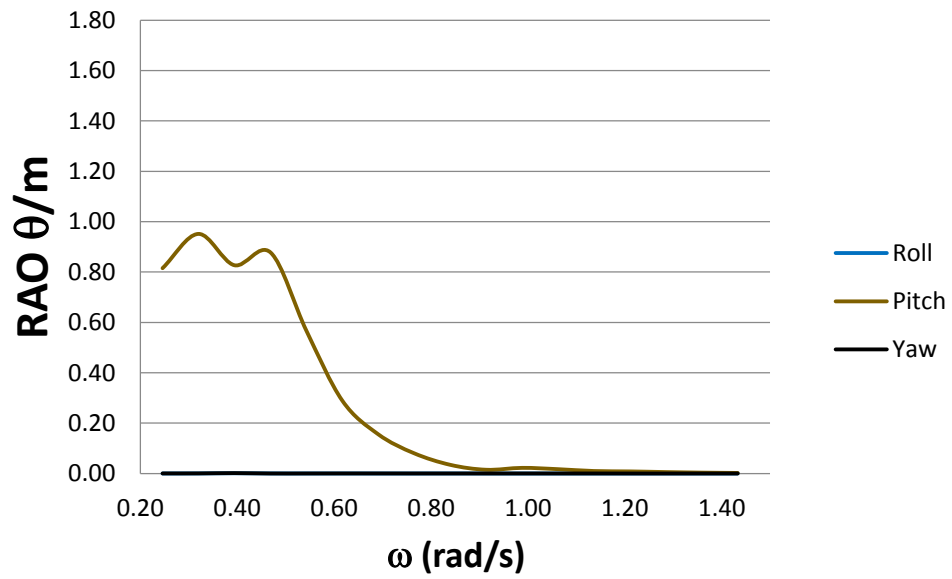


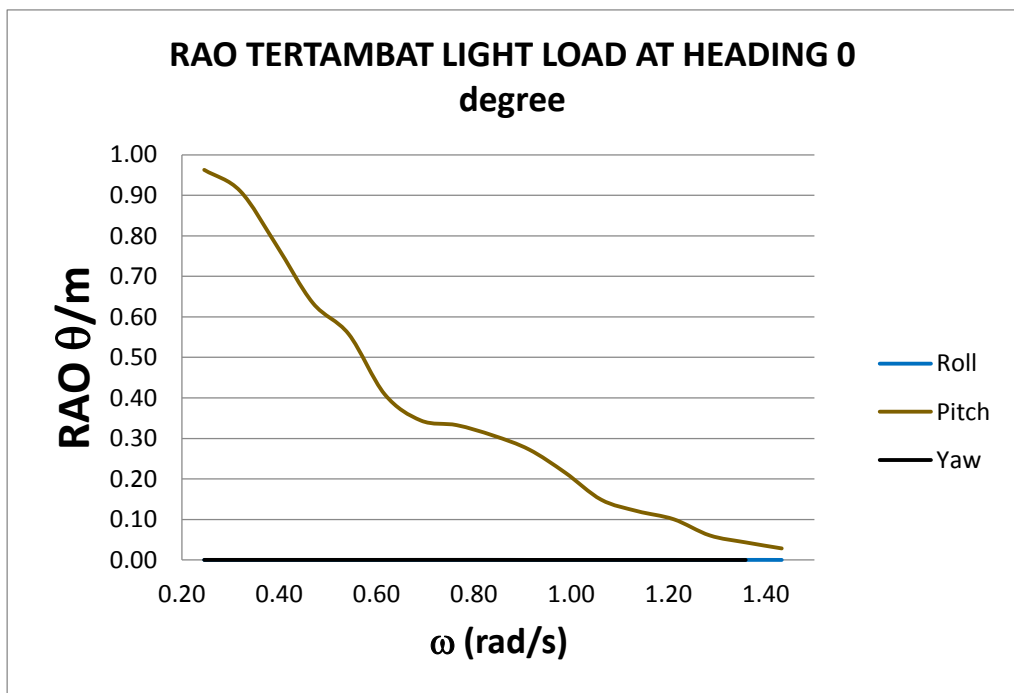
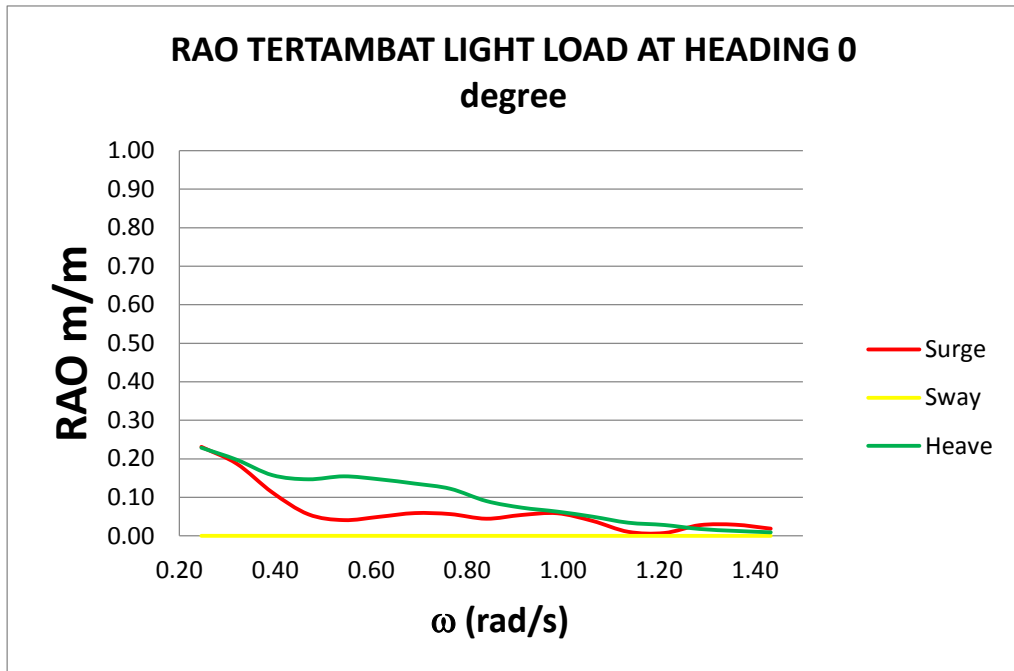


**RAO FREE FLOATING FULL LOAD AT HEADING 180**

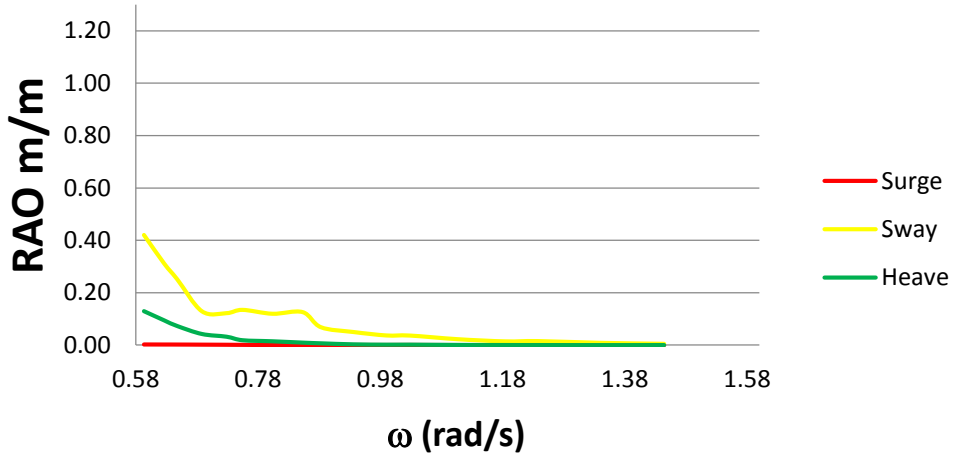


**RAO FREE FLOATING FULL LOAD AT HEADING 180**

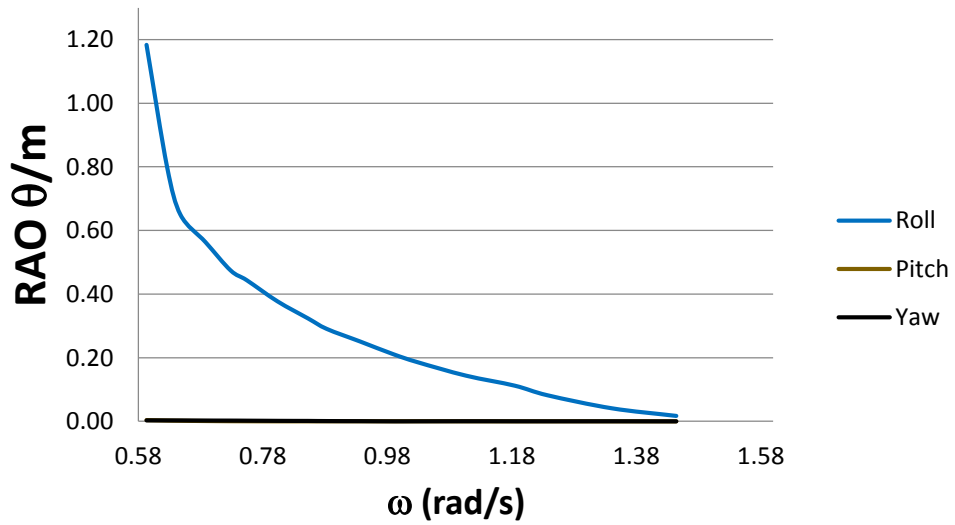


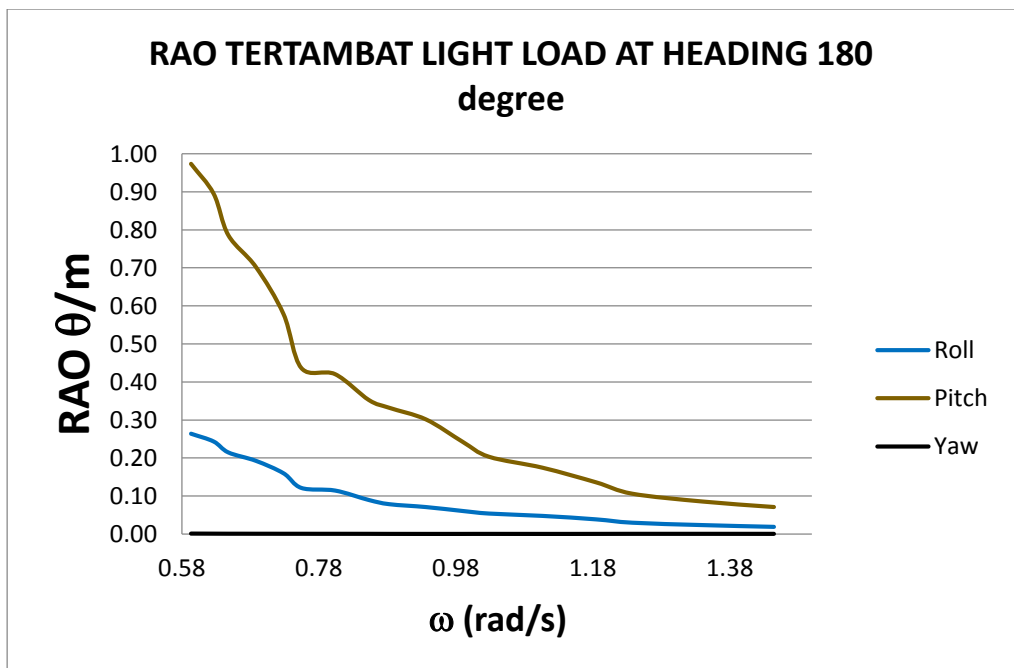
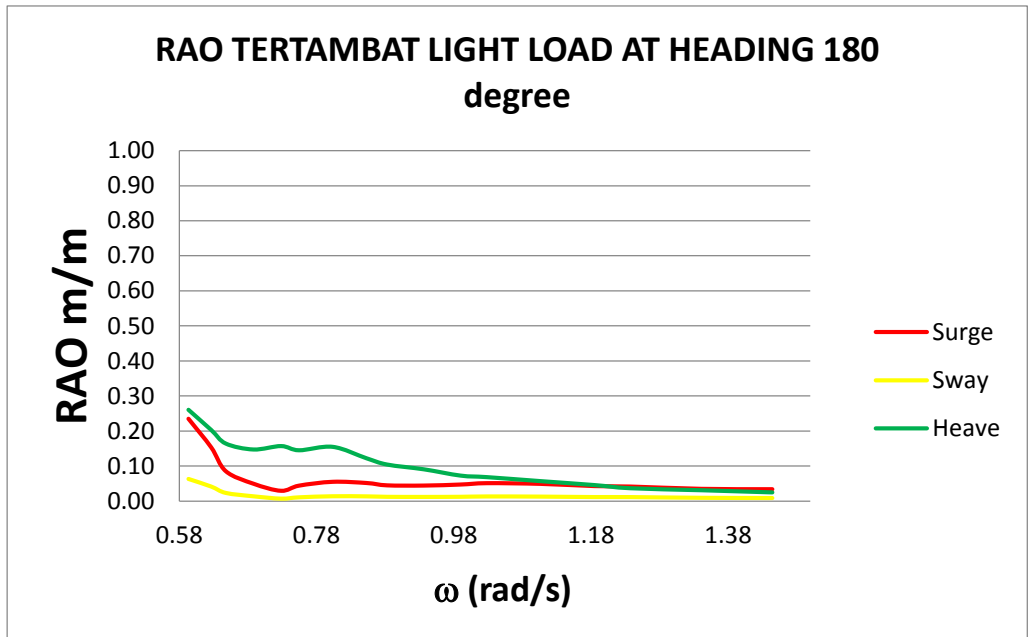


**RAO TERTAMBAT LIGHT LOAD AT HEADING 90 degree**

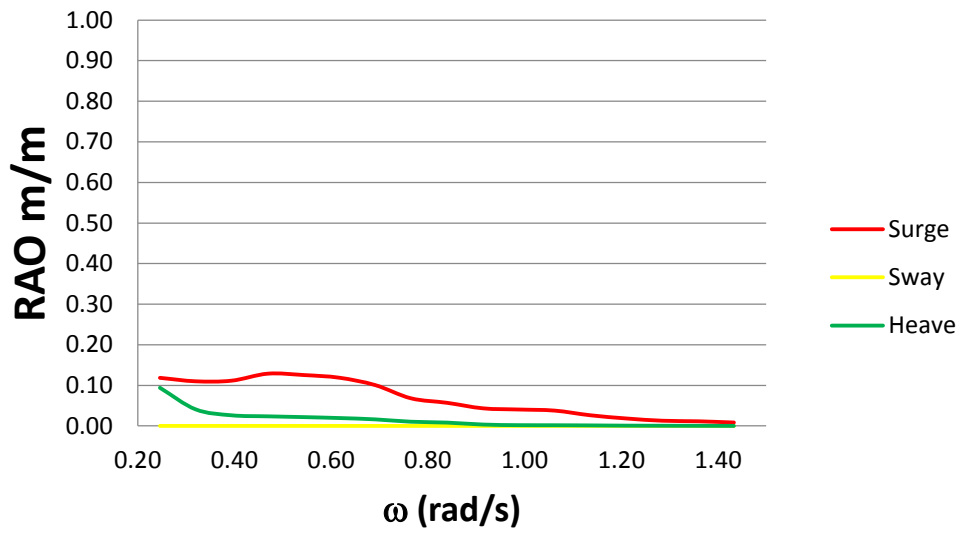


**RAO TERTAMBAT LIGHT LOAD AT HEADING 90 degree**

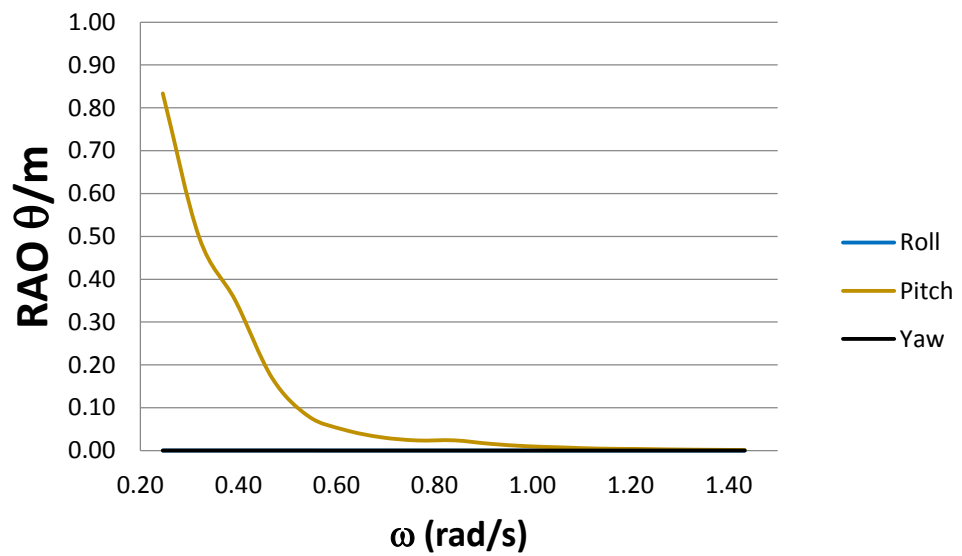


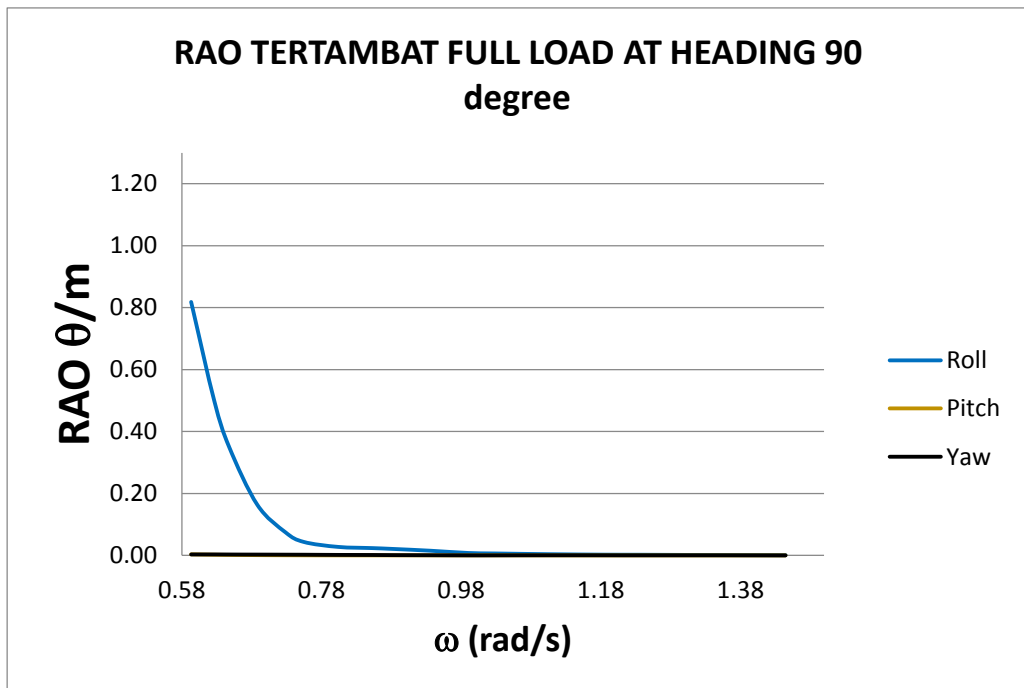
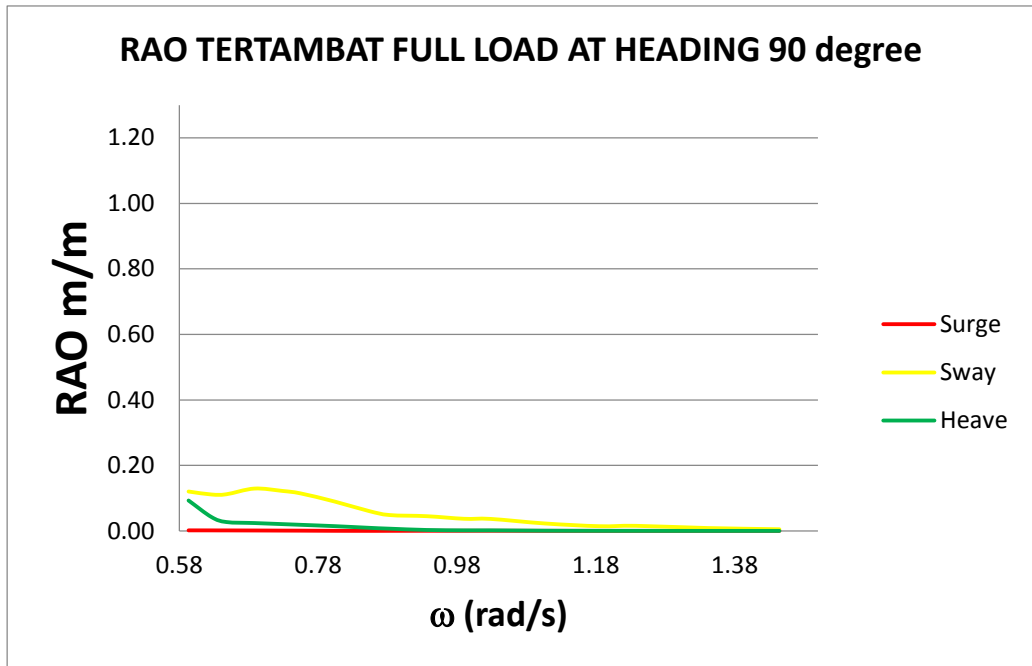


**RAO TERTAMBAT FULL LOAD AT HEADING 0 degree**



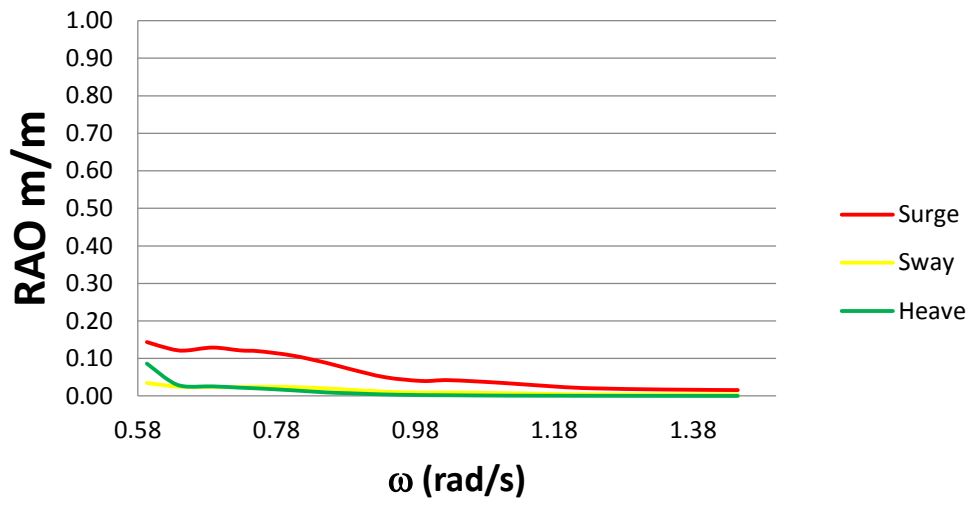
**RAO TERTAMBAT FULL LOAD AT HEADING 0 degree**



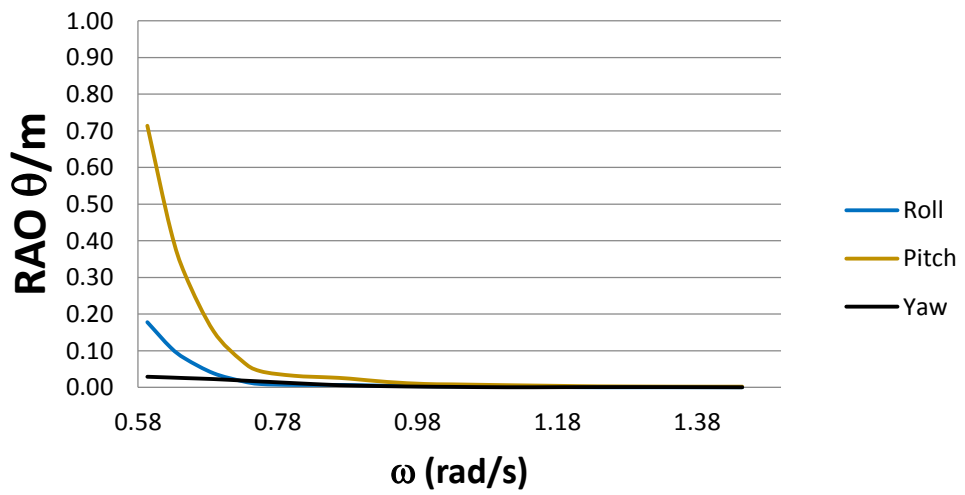




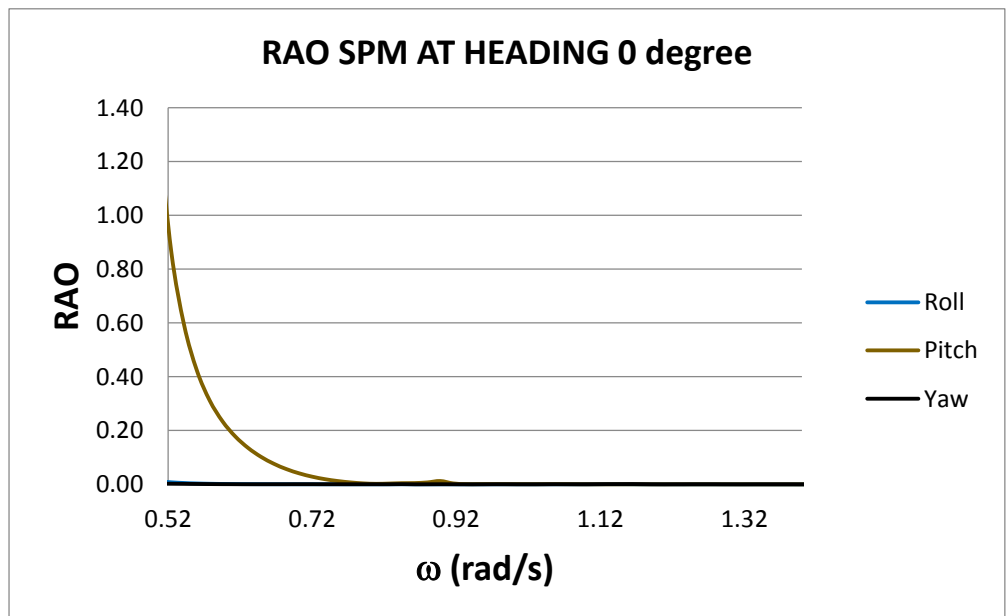
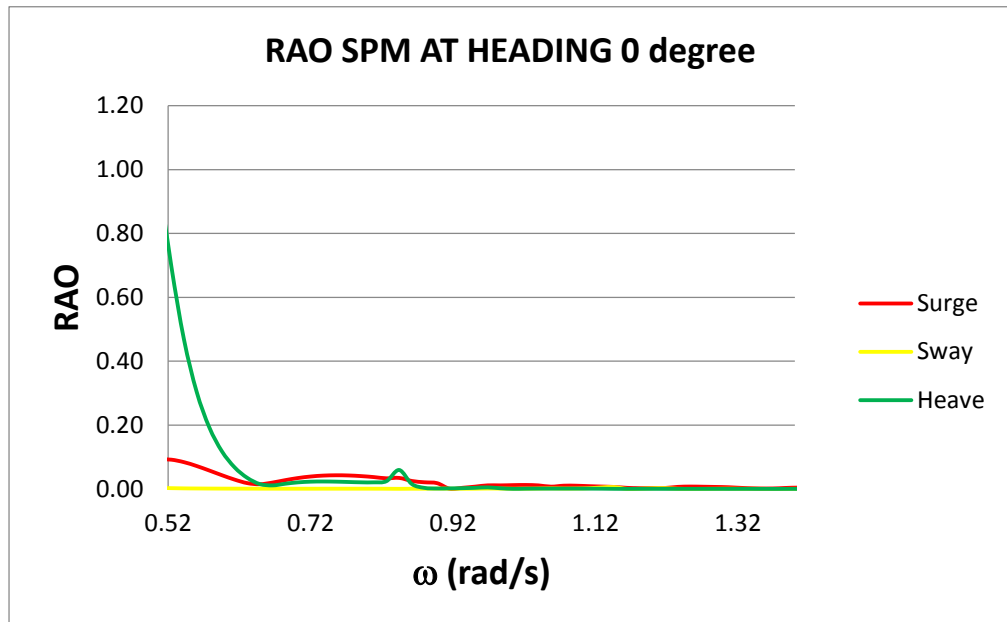
**RAO TERTAMBAT FULL LOAD AT HEADING 180 degree**



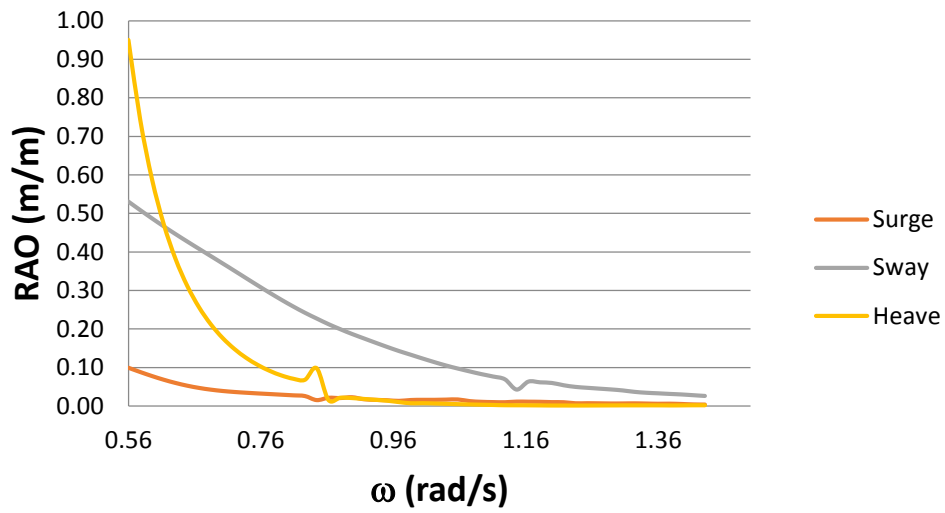
**RAO TERTAMBAT FULL LOAD AT HEADING 180 degree**



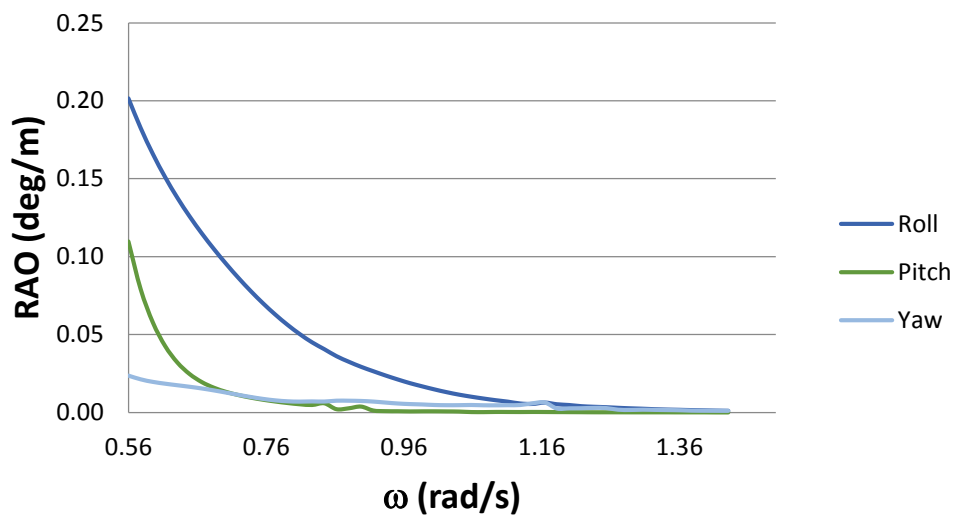
RAO FSO Arco Ardjuna kondisi free floating



### RAO SPM FULL DRAFT AT HEADING 90 degree TRANSLASIONAL



### RAO SPM FULL DRAFT AT HEADING 90 degree ROTASIONAL



**LAMPIRAN C**  
***LOAD DISTRIBUTION* FSO ARCO**  
**ARDJUNA**

**1. WEIGHT OF TYPICAL PART**

	Typoical Part Name	Weight	C.O.G. from its indiv. axis		
			x	y	z
<i>This data was obtained from the results of</i>	<i>OT BHD</i>	<i>423.53</i>	<i>0.15</i>	<i>0.01</i>	<i>13.20</i>
	<i>Fore BHD</i>	<i>193.24</i>	<i>-0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>12.47</i>
	<i>Midship Type</i>	<i>238.65</i>	<i>-0.03</i>	<i>-0.01</i>	<i>12.83</i>
	<i>Fore Mid Type</i>	<i>131.18</i>	<i>0.00</i>	<i>0.01</i>	<i>13.13</i>
	<i>Ordinary</i>	<i>207.82</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>13.07</i>
	<i>Fore Ordinary</i>	<i>131.19</i>	<i>0.00</i>	<i>0.01</i>	<i>13.13</i>
	<i>Swash BHD</i>	<i>272.46</i>	<i>0.00</i>	<i>0.01</i>	<i>13.17</i>
	<i>OT BHD Without Framing</i>	<i>292.34</i>	<i>0.22</i>	<i>0.01</i>	<i>13.23</i>

2. WEIGHT DISTRIBUTION

Pos	Type	Weight	C.O.G				Moment of C.O.G			Room Definition			
			From Indv.	x	y	z	x	y	z	aft	C.O.G (x)	fore	all
Post 1	AE	105.814	0.15	0.575	0.010	13.201	60.843	1.037	1396.854	0	0.575	1.15	1.15
Post 2	Part Pump Room	32.776	0.00	2.300	0.009	13.129	75.386	0.292	430.321	1.1	2.300	3.5	4.6
Post 3	OT BHD + 1/2 Part Pump Room	308.728	0.21	4.600	0.010	13.228	1420.150	3.129	4083.787	2.1	5.300	8.5	10.6
Post 4	Fore OT BHD	193.240	-0.01	6.900	0.008	12.467	1333.356	1.449	2409.123	5.4	6.900	8.4	13.8
Post 5	Midship Type	238.650	-0.03	9.200	-0.010	12.833	2195.580	-2.482	3062.595	8.4	9.200	10	18.4
Post 6	Fore Mid Type	131.180	0.00	11.500	0.009	13.128	1508.570	1.168	1722.131	10	11.500	13	23
Post 7	Ordinary Frame	207.820	0.01	13.800	0.015	13.074	2867.916	3.055	2717.039	13	13.800	14.6	27.6
Post 8	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	16.100	0.009	13.129	2112.159	1.168	1722.394	14.6	16.100	17.6	32.2
Post 9	Ordinary Frame	207.820	0.01	18.400	0.015	13.074	3823.888	3.055	2717.039	17.6	18.400	19.2	36.8
Post 10	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	20.700	0.009	13.129	2715.633	1.168	1722.394	19.2	20.700	22.2	41.4
Post 11	Ordinary Frame	207.820	0.01	23.000	0.015	13.074	4779.860	3.055	2717.039	22.2	23.000	23.8	46
Post 12	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	25.300	0.009	13.129	3319.107	1.168	1722.394	23.8	25.300	26.8	50.6
Post 13	Swash BHD	272.462	0.00	27.600	0.009	13.171	7519.962	2.580	3588.602	26.8	27.600	28.4	55.2
Post 14	Fore Swash BHD	193.240	-0.01	29.900	0.008	12.467	5777.876	1.449	2409.123	28.4	29.900	31.4	59.8
Post 15	Midship Type	238.650	-0.03	32.200	-0.010	12.833	7684.530	-2.482	3062.595	31.4	32.200	33	64.4
Post 16	Fore Mid Type	131.180	0.00	34.500	0.009	13.128	4525.710	1.168	1722.131	33	34.500	36	69
Post 17	Ordinary Frame	207.820	0.01	36.800	0.015	13.074	7647.776	3.055	2717.039	36	36.800	37.6	73.6
Post 18	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	39.100	0.009	13.129	5129.529	1.168	1722.394	37.6	39.100	40.6	78.2
Post 19	Ordinary Frame	207.820	0.01	41.400	0.015	13.074	8603.748	3.055	2717.039	40.6	41.400	42.2	82.8
Post 20	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	43.700	0.009	13.129	5733.003	1.168	1722.394	42.2	43.700	45.2	87.4
Post 21	Ordinary Frame	207.820	0.01	46.000	0.015	13.074	9559.720	3.055	2717.039	45.2	46.000	46.8	92
Post 22	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	48.300	0.009	13.129	6336.477	1.168	1722.394	46.8	48.300	49.8	96.6
Post 23	OT BHD	423.530	0.15	50.600	0.010	13.201	21430.618	4.151	5591.020	49.8	50.600	51.4	101.2
Post 24	Fore OT BHD	193.240	-0.01	52.900	0.008	12.467	10222.396	1.449	2409.123	51.4	52.900	54.4	105.8
Post 25	Midship Type	238.650	-0.03	55.200	-0.010	12.833	13173.480	-2.482	3062.595	54.4	55.200	56	110.4
Post 26	Fore Mid Type	131.180	0.00	57.500	0.009	13.128	7542.850	1.168	1722.131	56	57.500	59	115
Post 27	Ordinary Frame	207.820	0.01	59.800	0.015	13.074	12427.636	3.055	2717.039	59	59.800	60.6	119.6
Post 28	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	62.100	0.009	13.129	8146.899	1.168	1722.394	60.6	62.100	63.6	124.2
Post 29	Ordinary Frame	207.820	0.01	64.400	0.015	13.074	13383.608	3.055	2717.039	63.6	64.400	65.2	128.8
Post 30	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	66.700	0.009	13.129	8750.373	1.168	1722.394	65.2	66.700	68.2	133.4
Post 31	Ordinary Frame	207.820	0.01	69.000	0.015	13.074	14339.580	3.055	2717.039	68.2	69.000	69.8	138
Post 32	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	71.300	0.009	13.129	9353.847	1.168	1722.394	69.8	71.300	72.8	142.6
Post 33	Swash BHD	272.462	0.00	73.600	0.009	13.171	20053.232	2.580	3588.602	72.8	73.600	74.4	147.2
Post 34	Fore Swash BHD	193.240	-0.01	75.900	0.008	12.467	14666.916	1.449	2409.123	74.4	75.900	77.4	151.8
Post 35	Midship Type	238.650	-0.03	78.200	-0.010	12.833	18662.430	-2.482	3062.595	77.4	78.200	79	156.4
Post 36	Fore Mid Type	131.180	0.00	80.500	0.009	13.128	10559.990	1.168	1722.131	79	80.500	82	161
Post 37	Ordinary Frame	207.820	0.01	82.800	0.015	13.074	17207.496	3.055	2717.039	82	82.800	83.6	165.6
Post 38	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	85.100	0.009	13.129	11164.269	1.168	1722.394	83.6	85.100	86.6	170.2
Post 39	Ordinary Frame	207.820	0.01	87.400	0.015	13.074	18163.468	3.055	2717.039	86.6	87.400	88.2	174.8
Post 40	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	89.700	0.009	13.129	11767.743	1.168	1722.394	88.2	89.700	91.2	179.4
Post 41	Ordinary Frame	207.820	0.01	92.000	0.015	13.074	19119.440	3.055	2717.039	91.2	92.000	92.8	184
Post 42	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	94.300	0.009	13.129	12371.217	1.168	1722.394	92.8	94.300	95.8	188.6
Post 43	OT BHD	423.530	0.15	96.600	0.010	13.201	40912.998	4.151	5591.020	95.8	96.600	97.4	193.2
Post 44	Fore OT BHD	193.240	-0.01	98.900	0.008	12.467	19111.436	1.449	2409.123	97.4	98.900	100.4	197.8
Post 45	Midship Type	238.650	-0.03	101.200	-0.010	12.833	24151.380	-2.482	3062.595	100.4	101.200	102	202.4
Post 46	Fore Mid Type	131.180	0.00	103.500	0.009	13.128	13577.130	1.168	1722.131	102	103.500	105	207
Post 47	Ordinary Frame	207.820	0.01	105.800	0.015	13.074	21987.356	3.055	2717.039	105	105.800	106.6	211.6
Post 48	Fore Ordinary Frame	207.820	0.01	108.100	0.015	13.074	22465.342	3.055	2717.039	106.6	108.100	109.6	216.2
Post 49	Ordinary Frame	207.820	0.01	110.400	0.015	13.074	22943.328	3.055	2717.039	109.6	110.400	111.2	220.8
Post 50	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	112.700	0.009	13.129	14785.113	1.168	1722.394	111.2	112.700	114.2	225.4
Post 51	Ordinary Frame	207.820	0.01	115.000	0.015	13.074	23899.300	3.055	2717.039	114.2	115.000	115.8	230
Post 52	Fore Ordinary Frame	131.190	0.00	117.300	0.009	13.129	15388.587	1.168	1722.394	115.8	117.300	118.8	234.6
Post 53	Swash BHD	272.462	0.00	119.600	0.009	13.171	32586.502	2.580	3588.602	118.8	119.600	120.4	239.2
Post 54	Fore Swash BHD	187.399	-0.01	121.900	0.008	12.467	22843.903	1.405	2336.300	120.4	121.900	123.4	243.8
Post 55	Midship Type	214.393	-0.03	124.200	-0.010	12.833	26627.580	-2.230	2751.302	123.4	124.200	125	248.4
Post 56	Fore Mid Type	103.481	-0.03	126.500	0.009	13.128	13090.298	0.921	1358.494	125	126.500	128	253
Post 57	Ordinary Frame	142.585	0.01	128.800	0.015	13.074	18364.970	2.096	1864.159	128	128.800	129.6	257.6
Post 58	Fore Ordinary Frame	75.624	0.00	131.100	0.009	13.129	9914.246	0.673	992.861	129.6	131.100	132.6	262.2
Post 59	Swash BHD	127.163	0.00	133.400	0.009	13.171	16963.586	1.204	1674.868	132.6	133.400	134.2	266.8
Post 60	Fore Swash BHD	68.971	0.00	135.700	0.008	12.467	9359.396	0.517	859.864	134.2	135.700	137.2	271.4
Post 61	Ordinary Frame	52.748	0.01	138.000	0.015	13.074	7279.160	0.775	689.621	137.2	138.000	138.8	276
Post 62	Fore Ordinary Frame	18.846	0.00	140.300	0.009	13.129	2644.123	0.168	247.432	138.8	140.300	141.8	280.6
Post 63	FE BHD	25.138	0.15	142.025	0.010	13.201	3570.160	0.246	331.841	141.8	142.025	142.25	284.05
<b>Total Hull Structure</b>		<b>11105.243</b>		<b>67.509</b>	<b>0.008</b>	<b>13.014</b>	<b>749704.161</b>	<b>92.176</b>	<b>144520.924</b>				
<b>Lightship</b>		<b>15529.000</b>		<b>70.010</b>	<b>0.000</b>	<b>14.040</b>	<b>1087185.290</b>	<b>0.000</b>	<b>218027.160</b>				
Others Part	<b>Top Module &amp; Other Const.</b>	<b>4423.757</b>		<b>76.288</b>	<b>-0.021</b>	<b>16.616</b>	<b>337481.129</b>	<b>-92.176</b>	<b>73506.236</b>				

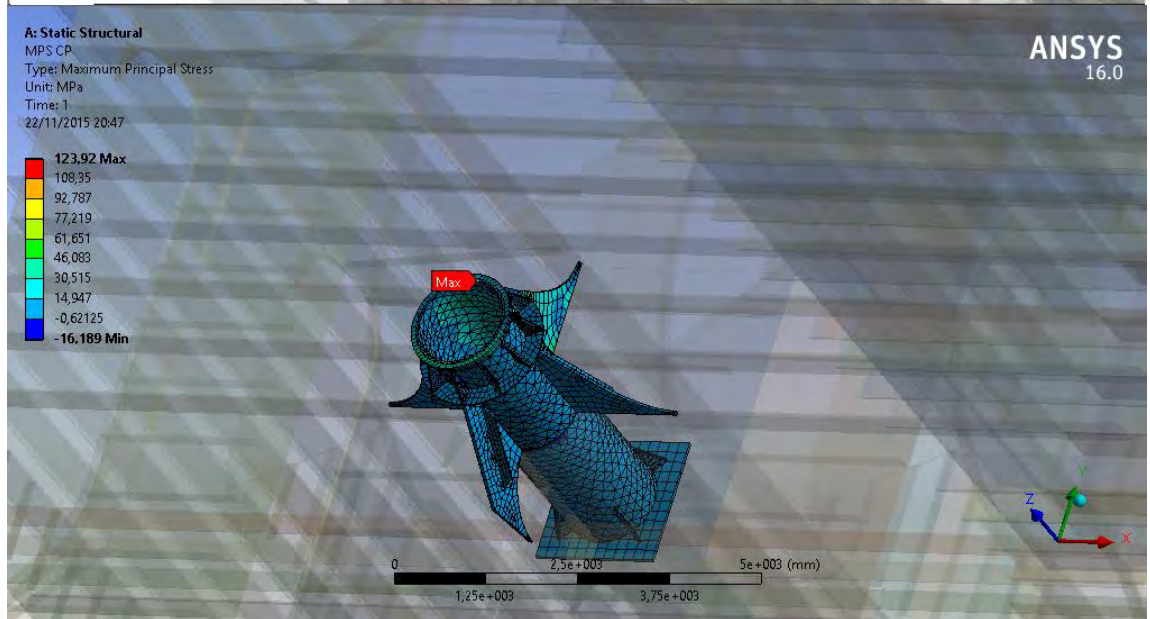
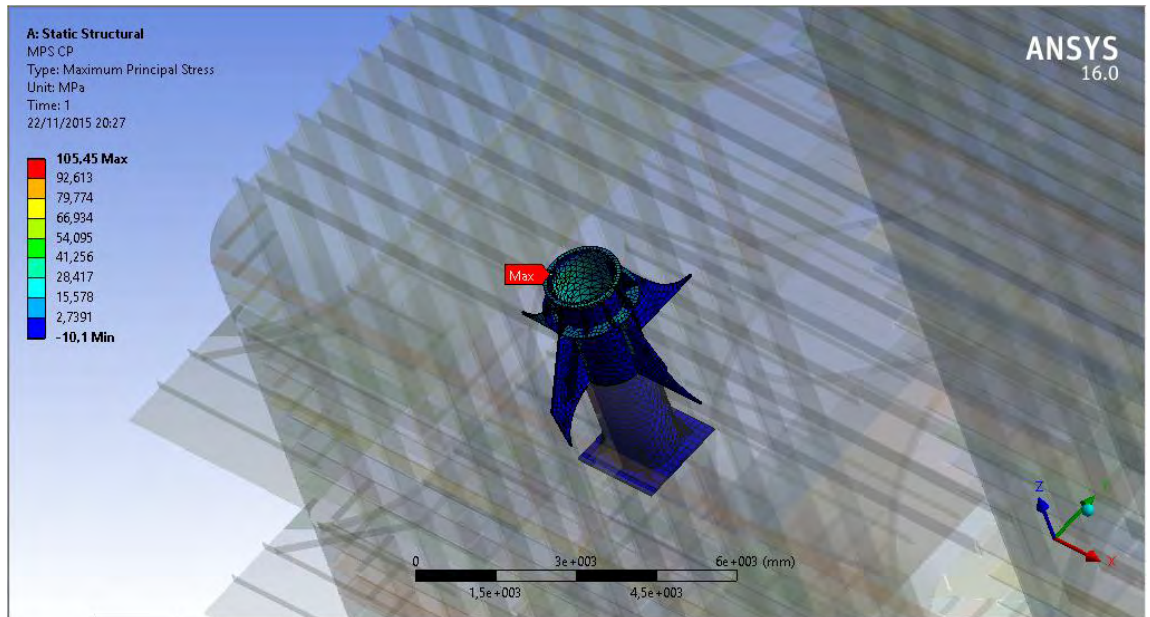


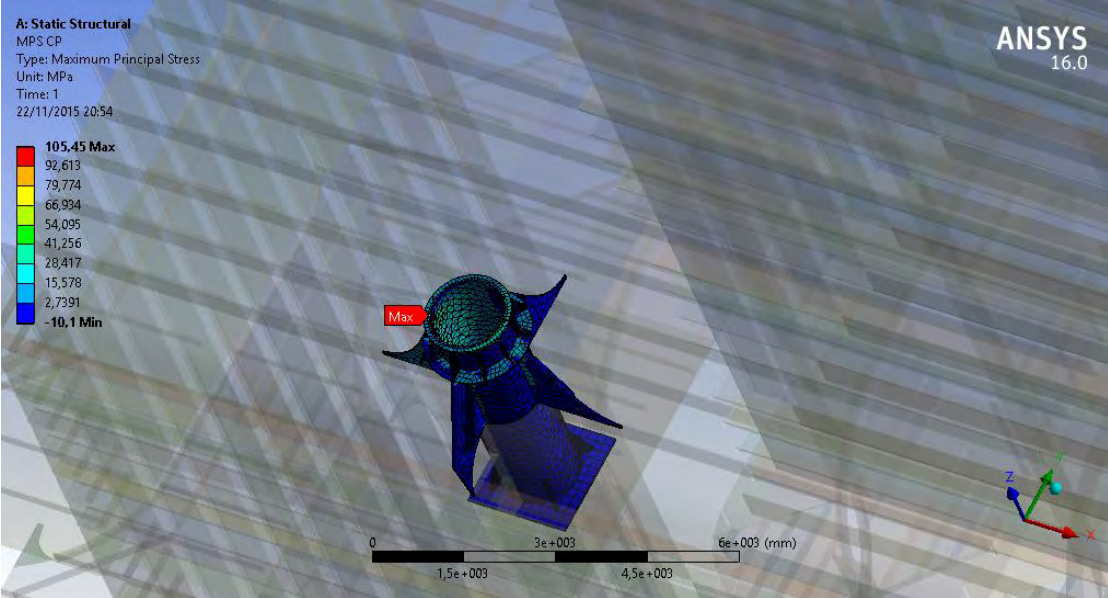
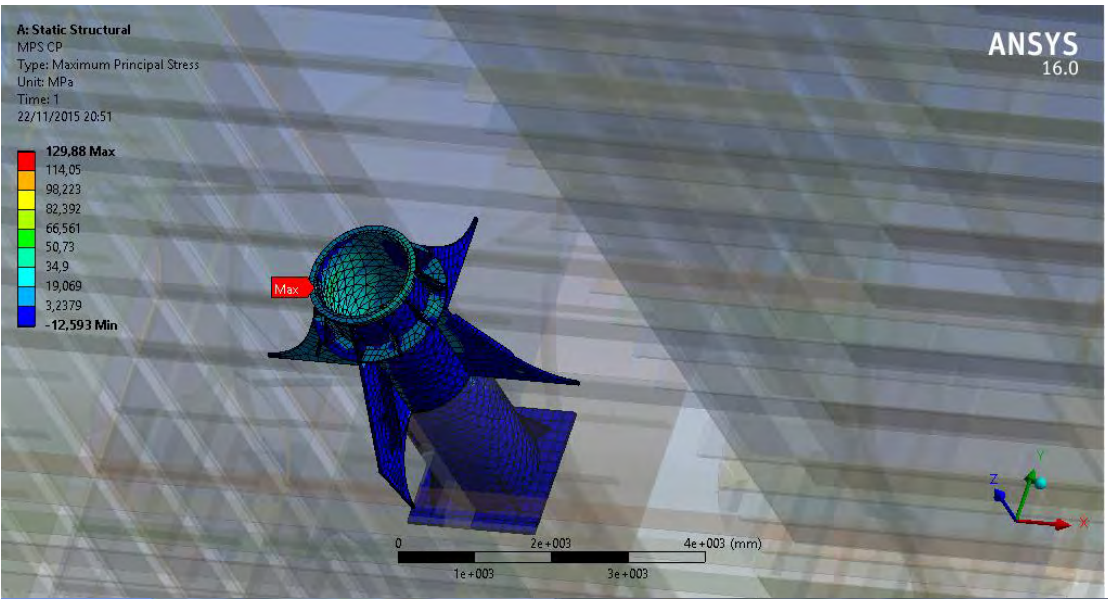
**LAMPIRAN D**  
**OUTPUT ANALISIS TEGANGAN**

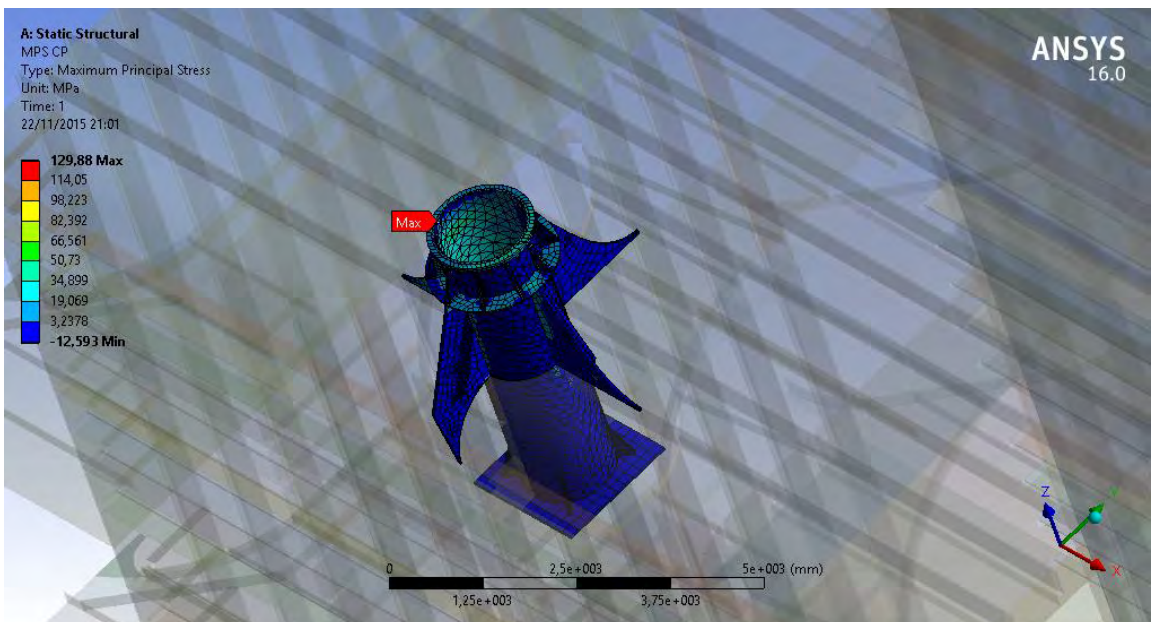
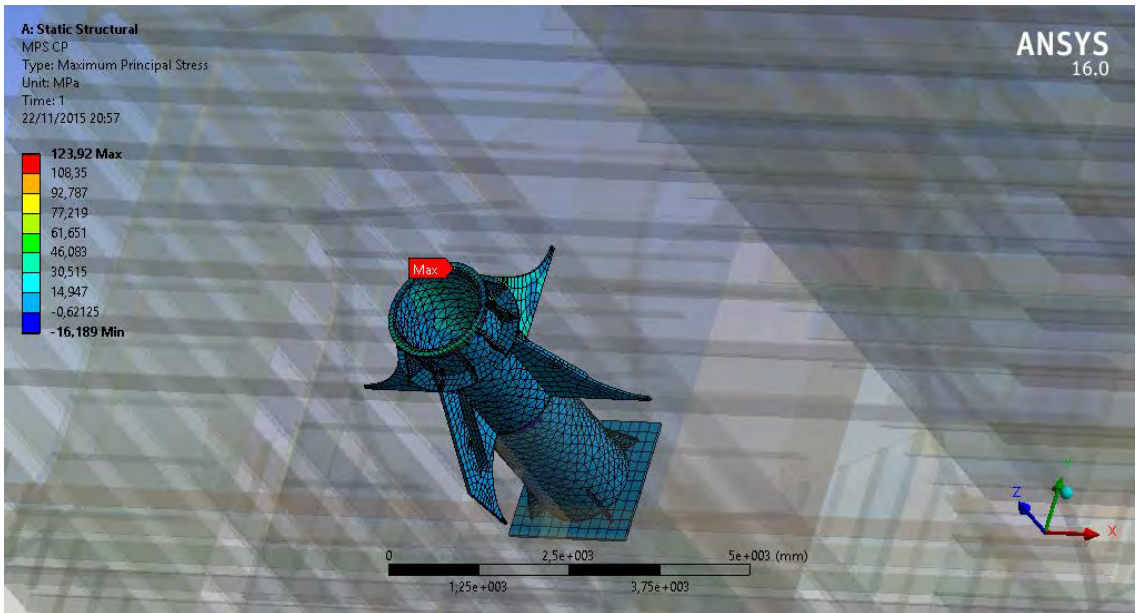


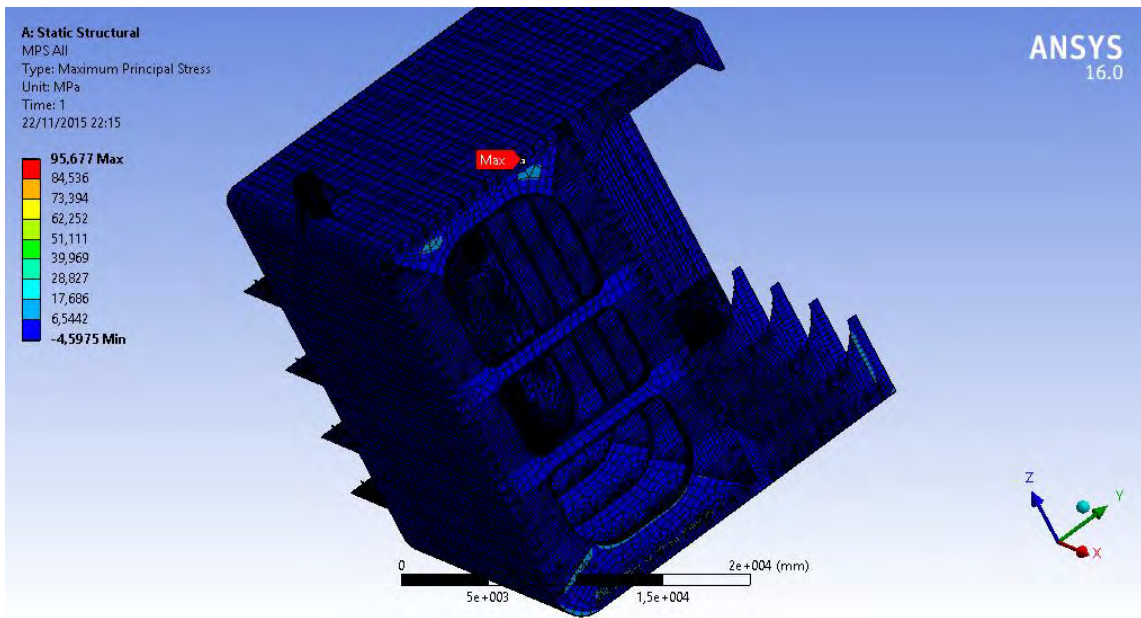
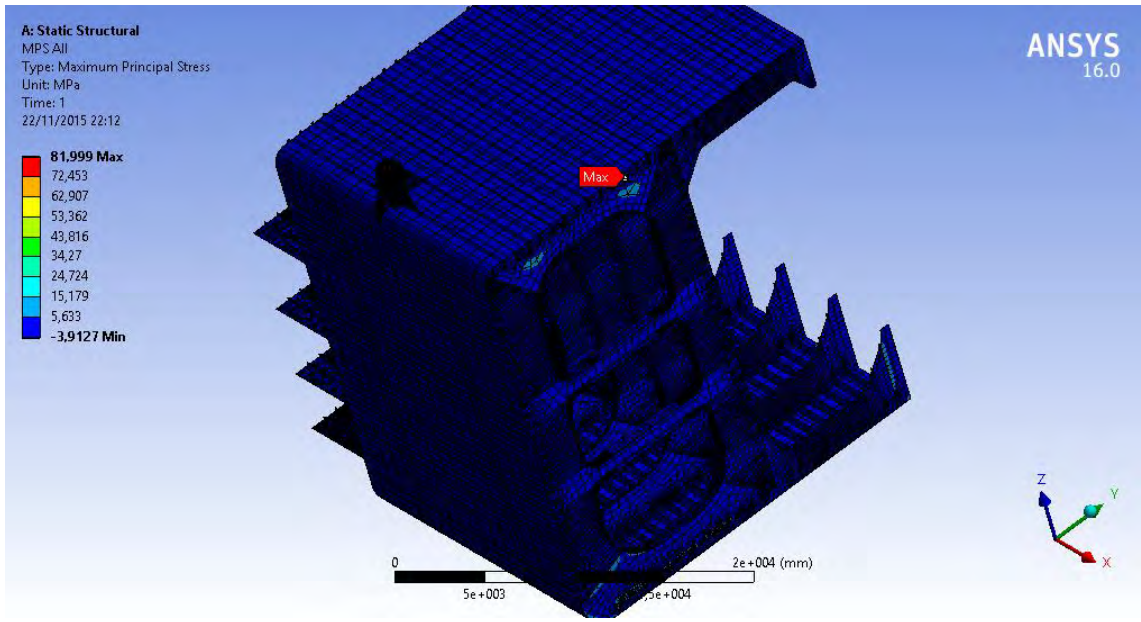


## Hasil Luaran Tegangan

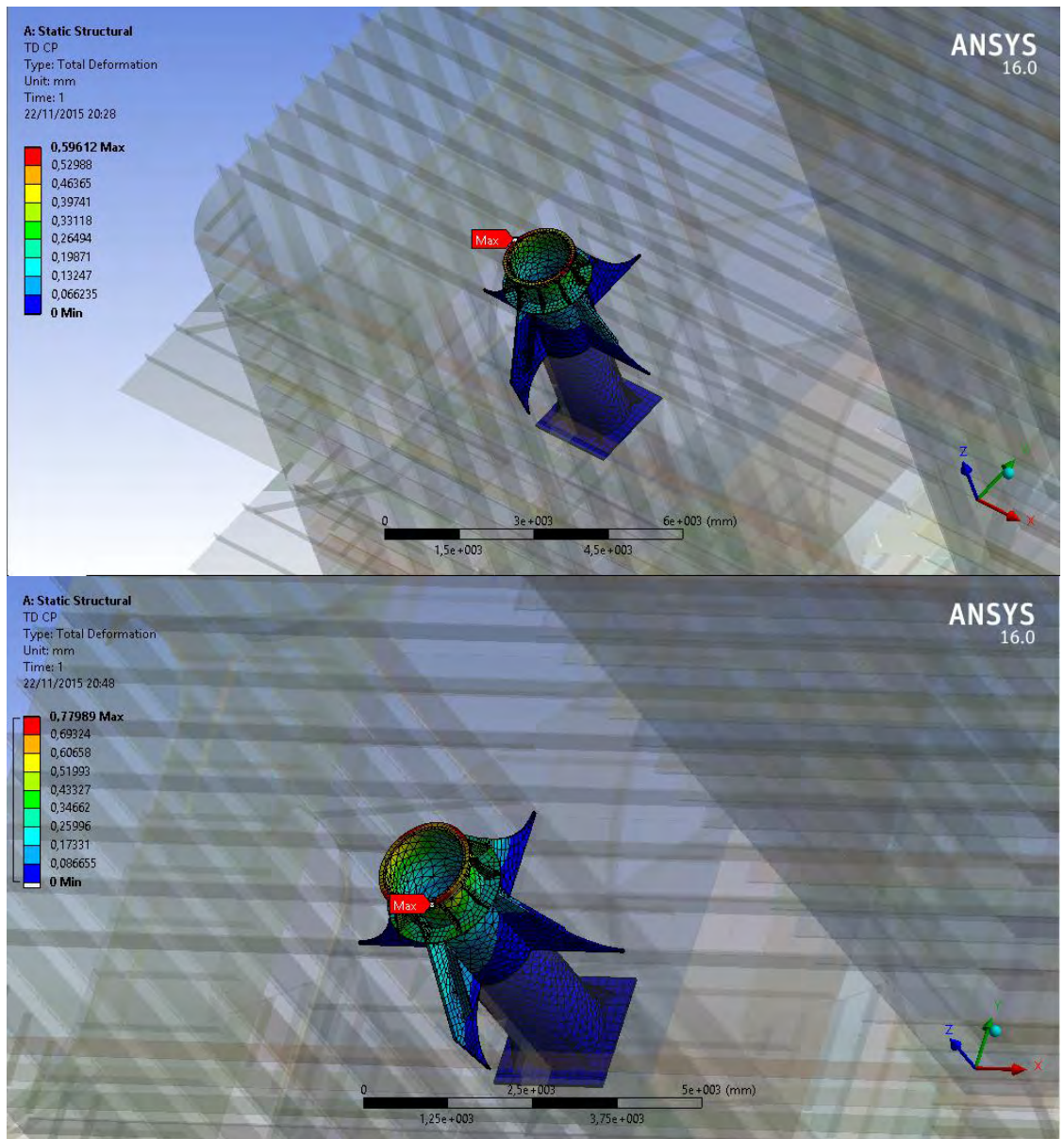


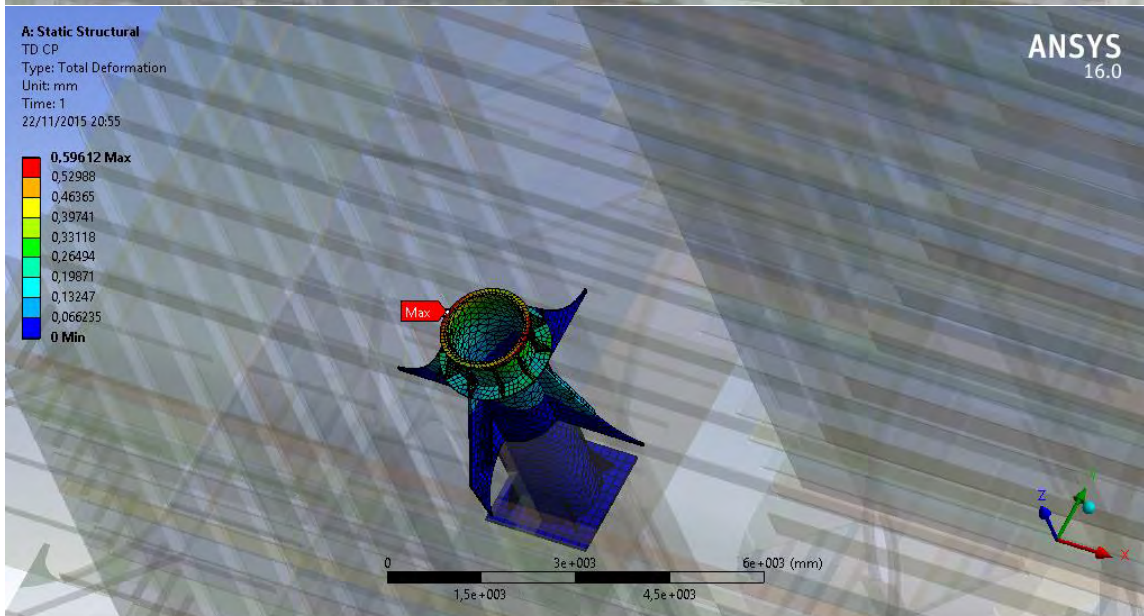
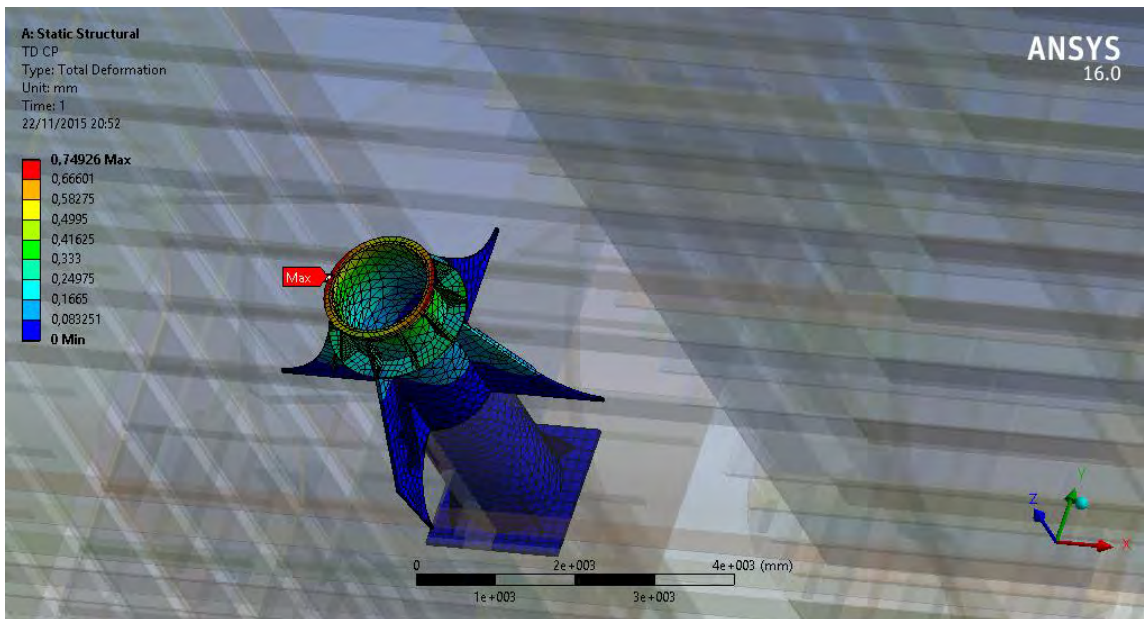


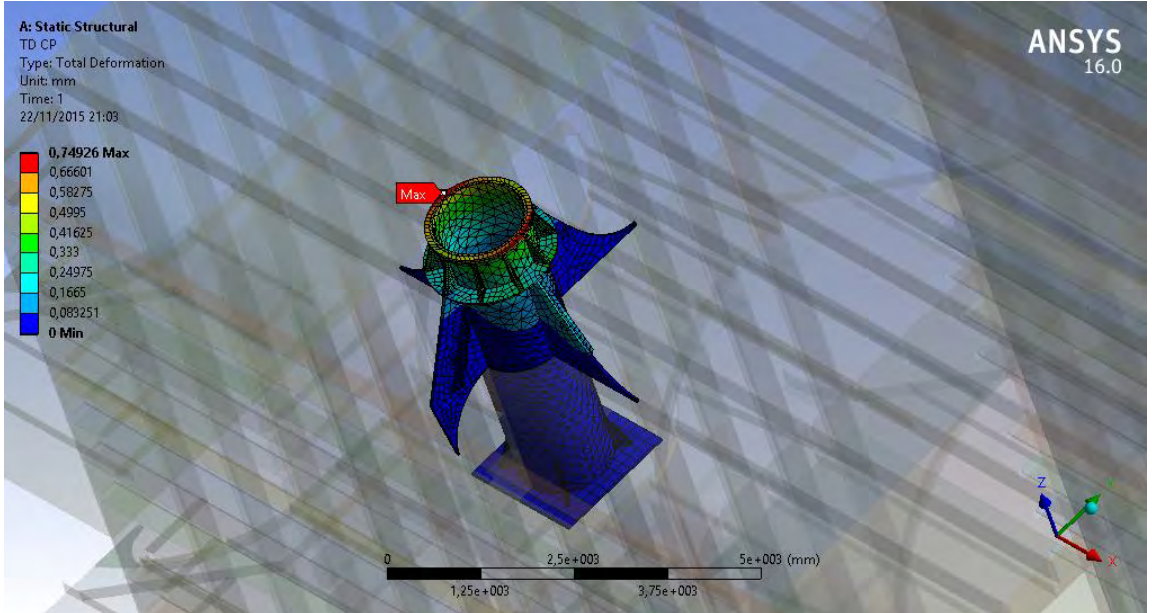
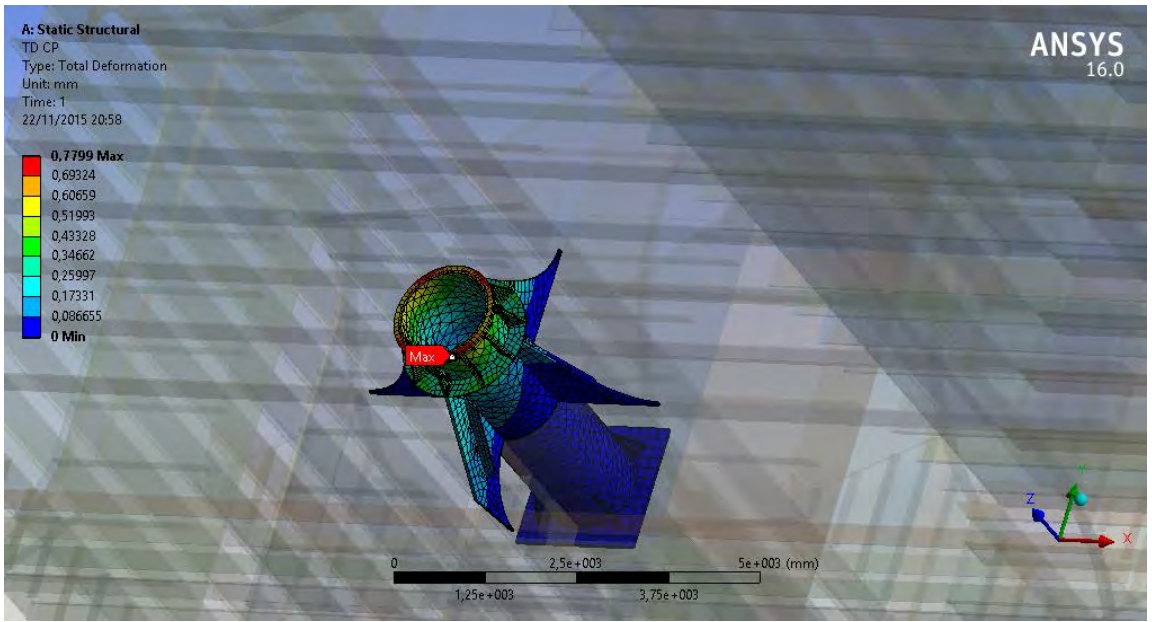




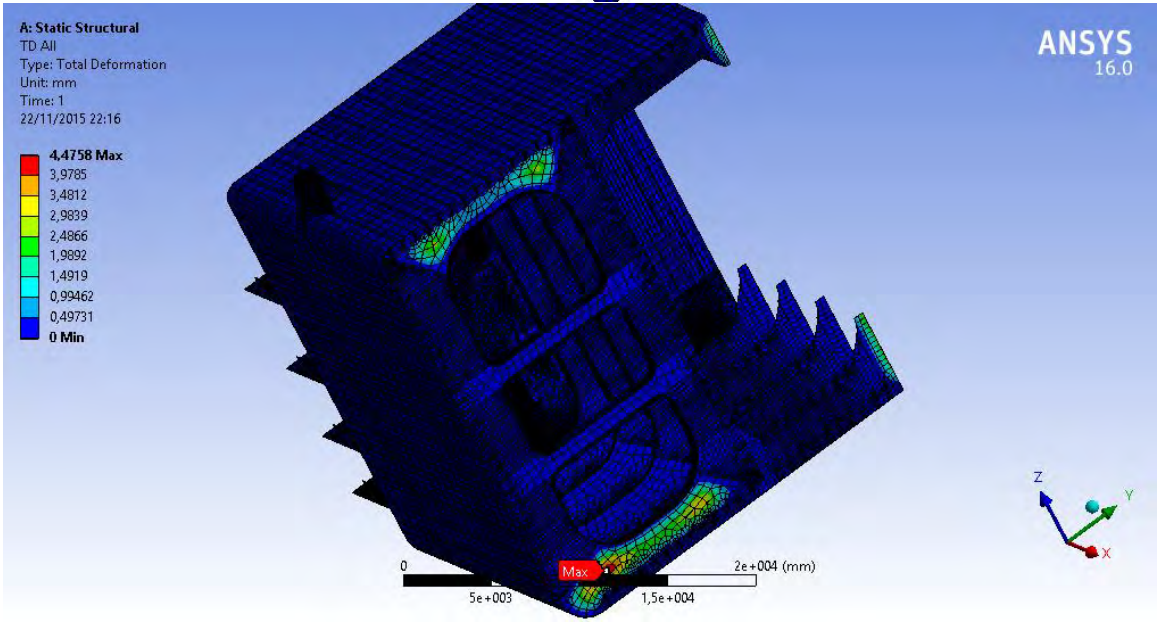
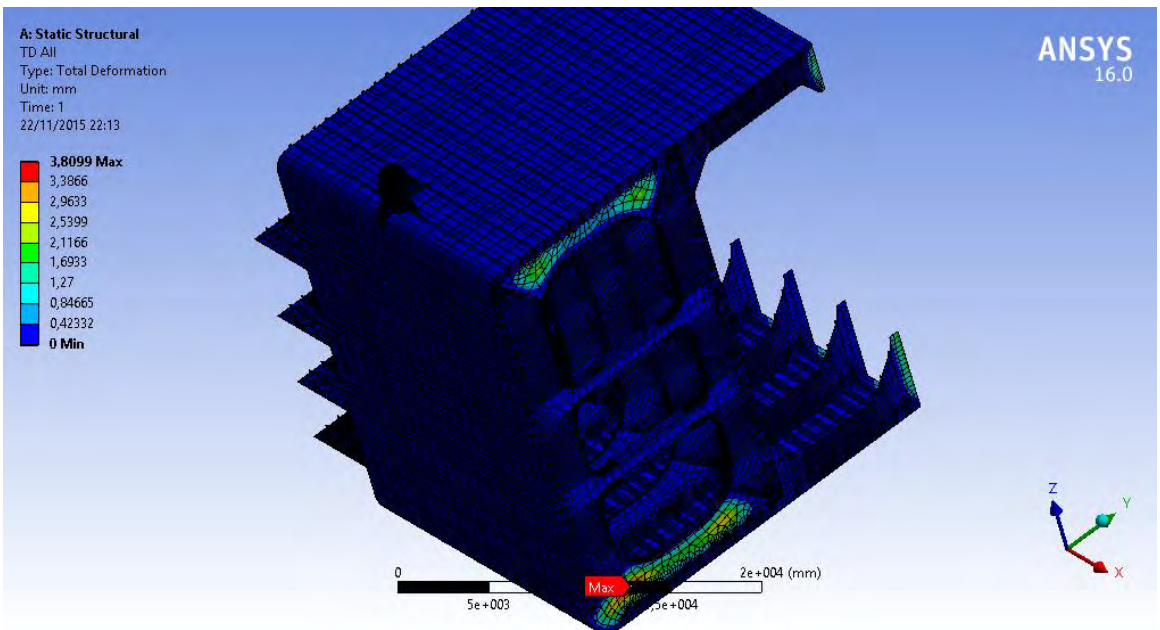
## Hasil Luaran Deformasi











**LAMPIRAN E**  
**PERHITUNGAN UMUR KELELAHAN**  
**KONSTRUKSI *CRANE PEDESTAL***



## Analysis Batch

Pembebanan	Keterangan				
LC-1	Max Stress	Light load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 0	Batch 1
LC-2	Max Stress	Light load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 90	
LC-3	Max Stress	Light load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 180	
LC-4	Min Stress	Light load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 0	
LC-5	Min Stress	Light load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 90	
LC-6	Min Stress	Light load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 180	
LC-7	Max Stress	Light load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 0	Batch 2
LC-8	Max Stress	Light load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 90	
LC-9	Max Stress	Light load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 180	
LC-10	Min Stress	Light load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 0	
LC-11	Min Stress	Light load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 90	
LC-12	Min Stress	Light load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 180	
LC-13	Max Stress	Full Load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 0	Batch 3
LC-14	Max Stress	Full Load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 90	
LC-15	Max Stress	Full Load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 180	
LC-16	Min Stress	Full Load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 0	
LC-17	Min Stress	Full Load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 90	
LC-18	Min Stress	Full Load	SFBM Sagging Effect	Motion Load Head 180	
LC-19	Max Stress	Full Load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 0	Batch 4
LC-20	Max Stress	Full Load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 90	
LC-21	Max Stress	Full Load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 180	
LC-22	Min Stress	Full Load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 0	
LC-23	Min Stress	Full Load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 90	
LC-24	Min Stress	Full Load	SFBM Hogging Effect	Motion Load Head 180	



## Hot-Spot Stress Analysis

LC-1			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	105.450	1.120	118.104
A1-2	101.070	1.120	113.198
A2-1	57.224	1.120	64.091
A2-2	56.556	1.120	63.343
A3-1	39.449	1.120	44.183
A3-2	40.617	1.120	45.491
A4-1	59.721	1.120	66.888
A4-2	55.794	1.120	62.489
A5-1	46.554	1.120	52.140
A5-2	45.149	1.120	50.567
A6-1	42.954	1.120	48.108
A6-2	43.726	1.120	48.973

LC-4			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	18.308	1.120	20.505
A1-2	17.719	1.120	19.845
A2-1	1.226	1.120	1.373
A2-2	1.585	1.120	1.775
A3-1	5.298	1.120	5.934
A3-2	6.882	1.120	7.708
A4-1	14.551	1.120	16.297
A4-2	13.520	1.120	15.142
A5-1	4.571	1.120	5.120
A5-2	4.075	1.120	4.564
A6-1	2.662	1.120	2.981
A6-2	4.542	1.120	5.087

LC-1 / LC-4			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	118.104	20.505	97.599
A1-2	113.198	19.845	93.353
A2-1	64.091	1.373	62.718
A2-2	63.343	1.775	61.568
A3-1	44.183	5.934	38.249
A3-2	45.491	7.708	37.783
A4-1	66.888	16.297	50.590
A4-2	62.489	15.142	47.347
A5-1	52.140	5.120	47.021
A5-2	50.567	4.564	46.003
A6-1	48.108	2.981	45.127
A6-2	48.973	5.087	43.886

LC-2			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	43.029	1.120	48.192
A1-2	43.961	1.120	49.236
A2-1	123.940	1.120	138.813
A2-2	122.820	1.120	137.558
A3-1	34.657	1.120	38.816
A3-2	35.091	1.120	39.302
A4-1	34.697	1.120	38.861
A4-2	34.157	1.120	38.256
A5-1	82.204	1.120	92.068
A5-2	79.232	1.120	88.740
A6-1	55.931	1.120	62.643
A6-2	53.571	1.120	60.000

LC-5			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	3.901	1.120	4.369
A1-2	4.709	1.120	5.274
A2-1	30.921	1.120	34.632
A2-2	29.217	1.120	32.723
A3-1	2.321	1.120	2.600
A3-2	4.036	1.120	4.520
A4-1	1.504	1.120	1.684
A4-2	1.633	1.120	1.829
A5-1	25.557	1.120	28.624
A5-2	28.227	1.120	31.614
A6-1	14.700	1.120	16.464
A6-2	15.090	1.120	16.901

LC-2 / LC-5			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	48.192	4.369	43.823
A1-2	49.236	5.274	43.962
A2-1	138.813	34.632	104.181
A2-2	137.558	32.723	104.835
A3-1	38.816	2.600	36.216
A3-2	39.302	4.520	34.782
A4-1	38.861	1.684	37.176
A4-2	38.256	1.829	36.427
A5-1	92.068	28.624	63.445
A5-2	88.740	31.614	57.126
A6-1	62.643	16.464	46.179
A6-2	60.000	16.901	43.099

LC-3			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	120.650	1.120	135.128
A1-2	119.450	1.120	133.784
A2-1	60.363	1.120	67.607
A2-2	61.737	1.120	69.145
A3-1	10.413	1.120	11.663
A3-2	9.713	1.120	10.879
A4-1	56.281	1.120	63.035
A4-2	60.260	1.120	67.491
A5-1	56.157	1.120	62.896
A5-2	54.157	1.120	60.656
A6-1	49.959	1.120	55.954
A6-2	49.367	1.120	55.291

LC-6			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	42.957	1.120	48.112
A1-2	41.223	1.120	46.170
A2-1	16.466	1.120	18.442
A2-2	21.770	1.120	24.382
A3-1	0.389	1.120	0.436
A3-2	0.219	1.120	0.246
A4-1	2.553	1.120	2.859
A4-2	4.979	1.120	5.576
A5-1	13.333	1.120	14.933
A5-2	12.932	1.120	14.484
A6-1	6.274	1.120	7.027
A6-2	5.676	1.120	6.357

LC-3 / LC-6			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	135.128	48.112	87.016
A1-2	133.784	46.170	87.614
A2-1	67.607	18.442	49.165
A2-2	69.145	24.382	44.763
A3-1	11.663	0.436	11.227
A3-2	10.879	0.246	10.633
A4-1	63.035	2.859	60.175
A4-2	67.491	5.576	61.915
A5-1	62.896	14.933	47.963
A5-2	60.656	14.484	46.172
A6-1	55.954	7.027	48.927
A6-2	55.291	6.357	48.934

LC-7			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	105.450	1.120	118.104
A1-2	104.760	1.120	117.331
A2-1	57.419	1.120	64.309
A2-2	58.086	1.120	65.056
A3-1	38.102	1.120	42.674
A3-2	38.003	1.120	42.563
A4-1	20.227	1.120	22.654
A4-2	22.221	1.120	24.888
A5-1	45.107	1.120	50.520
A5-2	44.326	1.120	49.645
A6-1	40.657	1.120	45.536
A6-2	37.634	1.120	42.150

LC-10			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	47.224	1.120	52.891
A1-2	49.465	1.120	55.401
A2-1	16.494	1.120	18.473
A2-2	18.269	1.120	20.461
A3-1	5.196	1.120	5.820
A3-2	6.709	1.120	7.514
A4-1	1.702	1.120	1.906
A4-2	1.317	1.120	1.475
A5-1	4.936	1.120	5.528
A5-2	5.762	1.120	6.453
A6-1	2.481	1.120	2.779
A6-2	1.773	1.120	1.986

LC-7 / LC-10			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	118.104	52.891	65.213
A1-2	117.331	55.401	61.930
A2-1	64.309	18.473	45.836
A2-2	65.056	20.461	44.595
A3-1	42.674	5.820	36.855
A3-2	42.563	7.514	35.049
A4-1	22.654	1.906	20.748
A4-2	24.888	1.475	23.412
A5-1	50.520	5.528	44.992
A5-2	49.645	6.453	43.192
A6-1	45.536	2.779	42.757
A6-2	42.150	1.986	40.164

LC-8			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	81.216	1.120	90.962
A1-2	81.205	1.120	90.950
A2-1	151.120	1.120	169.254
A2-2	150.340	1.120	168.381
A3-1	33.840	1.120	37.901
A3-2	33.682	1.120	37.724
A4-1	34.623	1.120	38.778
A4-2	34.050	1.120	38.136
A5-1	78.488	1.120	87.907
A5-2	78.336	1.120	87.736
A6-1	57.094	1.120	63.945
A6-2	58.249	1.120	65.239

LC-11			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	0.197	1.120	0.221
A1-2	0.049	1.120	0.055
A2-1	47.070	1.120	52.718
A2-2	47.600	1.120	53.312
A3-1	6.758	1.120	7.569
A3-2	5.436	1.120	6.088
A4-1	3.112	1.120	3.485
A4-2	2.794	1.120	3.129
A5-1	17.618	1.120	19.732
A5-2	18.889	1.120	21.156
A6-1	9.456	1.120	10.591
A6-2	11.343	1.120	12.704

LC-8 / LC-11			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	90.962	0.221	90.741
A1-2	90.950	0.055	90.895
A2-1	169.254	52.718	116.536
A2-2	168.381	53.312	115.069
A3-1	37.901	7.569	30.332
A3-2	37.724	6.088	31.636
A4-1	38.778	3.485	35.292
A4-2	38.136	3.129	35.007
A5-1	87.907	19.732	68.174
A5-2	87.736	21.156	66.581
A6-1	63.945	10.591	53.355
A6-2	65.239	12.704	52.535

LC-9			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	129.880	1.120	145.466
A1-2	128.950	1.120	144.424
A2-1	70.826	1.120	79.325
A2-2	71.223	1.120	79.770
A3-1	49.409	1.120	55.338
A3-2	48.065	1.120	53.833
A4-1	74.535	1.120	83.479
A4-2	73.296	1.120	82.092
A5-1	57.494	1.120	64.393
A5-2	56.206	1.120	62.951
A6-1	49.977	1.120	55.974
A6-2	49.613	1.120	55.567

LC-12			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A2-1	19.550	1.120	21.896
A2-2	21.210	1.120	23.755
A2-1	18.489	1.120	20.708
A2-2	18.438	1.120	20.651
A3-1	17.411	1.120	19.500
A3-2	18.462	1.120	20.677
A1-1	20.480	1.120	22.938
A1-2	21.191	1.120	23.734
A5-1	7.534	1.120	8.438
A5-2	7.795	1.120	8.730
A6-1	3.660	1.120	4.099
A6-2	4.233	1.120	4.741

LC-9 / LC-12			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	83.479	22.938	60.542
A1-2	82.092	23.734	58.358
A2-1	79.325	20.708	58.617
A2-2	79.770	20.651	59.119
A3-1	55.338	19.500	35.838
A3-2	53.833	20.677	33.155
A4-1	83.479	22.938	60.542
A4-2	82.092	23.734	58.358
A5-1	64.393	8.438	55.955
A5-2	62.951	8.730	54.220
A6-1	55.974	4.099	51.875
A6-2	55.567	4.741	50.826



LC-13			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	19.710	1.120	22.075
A1-2	17.810	1.120	19.947
A2-1	40.331	1.120	45.171
A2-2	36.616	1.120	41.010
A3-1	21.641	1.120	24.238
A3-2	19.076	1.120	21.365
A4-1	15.406	1.120	17.255
A4-2	9.523	1.120	10.666
A5-1	17.390	1.120	19.477
A5-2	17.447	1.120	19.541
A6-1	16.292	1.120	18.247
A6-2	15.114	1.120	16.928

LC-16			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	0.780	1.120	0.874
A1-2	3.902	1.120	4.370
A2-1	8.651	1.120	9.689
A2-2	8.261	1.120	9.252
A3-1	6.285	1.120	7.039
A3-2	9.607	1.120	10.760
A4-1	10.803	1.120	12.099
A4-2	4.104	1.120	4.596
A5-1	9.187	1.120	10.289
A5-2	7.142	1.120	7.999
A6-1	6.223	1.120	6.970
A6-2	6.124	1.120	6.859

LC-13 / LC-16			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	22.075	0.874	21.202
A1-2	19.947	4.370	15.577
A2-1	45.171	9.689	35.482
A2-2	41.010	9.252	31.758
A3-1	24.238	7.039	17.199
A3-2	21.365	10.760	10.605
A4-1	17.255	12.099	5.155
A4-2	10.666	4.596	6.069
A5-1	19.477	10.289	9.187
A5-2	19.541	7.999	11.542
A6-1	18.247	6.970	11.277
A6-2	16.928	6.859	10.069

LC-14			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	16.331	1.120	18.291
A1-2	19.771	1.120	22.144
A2-1	63.238	1.120	70.827
A2-2	45.667	1.120	51.147
A3-1	16.912	1.120	18.941
A3-2	19.894	1.120	22.281
A4-1	16.496	1.120	18.476
A4-2	18.844	1.120	21.105
A5-1	47.016	1.120	52.658
A5-2	45.191	1.120	50.614
A6-1	25.834	1.120	28.934
A6-2	28.168	1.120	31.548

LC-17			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	3.876	1.120	4.341
A1-2	11.762	1.120	13.173
A2-1	10.976	1.120	12.293
A2-2	26.295	1.120	29.450
A3-1	2.223	1.120	2.490
A3-2	5.541	1.120	6.206
A4-1	4.596	1.120	5.148
A4-2	1.515	1.120	1.697
A5-1	8.098	1.120	9.070
A5-2	12.590	1.120	14.101
A6-1	6.326	1.120	7.085
A6-2	5.996	1.120	6.716

LC-14 / LC-17			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	18.291	4.341	13.950
A1-2	22.144	13.173	8.970
A2-1	70.827	12.293	58.533
A2-2	51.147	29.450	21.697
A3-1	18.941	2.490	16.452
A3-2	22.281	6.206	16.075
A4-1	18.476	5.148	13.328
A4-2	21.105	1.697	19.408
A5-1	52.658	9.070	43.588
A5-2	50.614	14.101	36.513
A6-1	28.934	7.085	21.849
A6-2	31.548	6.716	24.833

LC-15			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	39.600	1.120	44.352
A1-2	35.116	1.120	39.330
A2-1	21.610	1.120	24.203
A2-2	15.402	1.120	17.250
A3-1	2.111	1.120	2.364
A3-2	13.922	1.120	15.593
A4-1	21.247	1.120	23.797
A4-2	21.203	1.120	23.747
A5-1	17.762	1.120	19.893
A5-2	17.133	1.120	19.189
A6-1	15.155	1.120	16.974
A6-2	13.045	1.120	14.610

LC-18			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	9.116	1.120	10.210
A1-2	13.848	1.120	15.510
A2-1	1.655	1.120	1.854
A2-2	8.605	1.120	9.638
A3-1	0.078	1.120	0.087
A3-2	7.600	1.120	8.512
A4-1	5.706	1.120	6.391
A4-2	5.562	1.120	6.229
A5-1	9.620	1.120	10.774
A5-2	9.481	1.120	10.619
A6-1	8.960	1.120	10.035
A6-2	6.344	1.120	7.105

LC-15 / LC-18			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	44.352	10.210	34.142
A1-2	39.330	15.510	23.820
A2-1	24.203	1.854	22.350
A2-2	17.250	9.638	7.613
A3-1	2.364	0.087	2.277
A3-2	15.593	8.512	7.081
A4-1	23.797	6.391	17.406
A4-2	23.747	6.229	17.518
A5-1	19.893	10.774	9.119
A5-2	19.189	10.619	8.570
A6-1	16.974	10.035	6.938
A6-2	14.610	7.105	7.505

LC-19			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	40.331	1.120	45.171
A1-2	39.315	1.120	44.033
A2-1	22.065	1.120	24.713
A2-2	20.298	1.120	22.734
A3-1	2.138	1.120	2.395
A3-2	14.599	1.120	16.351
A4-1	19.231	1.120	21.539
A4-2	22.903	1.120	25.651
A5-1	17.540	1.120	19.645
A5-2	16.119	1.120	18.053
A6-1	17.393	1.120	19.480
A6-2	15.922	1.120	17.833

LC-22			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	11.428	1.120	12.799
A1-2	14.062	1.120	15.749
A2-1	4.396	1.120	4.924
A2-2	9.508	1.120	10.649
A3-1	0.058	1.120	0.065
A3-2	2.818	1.120	3.156
A4-1	2.579	1.120	2.888
A4-2	10.611	1.120	11.884
A5-1	8.196	1.120	9.180
A5-2	10.696	1.120	11.980
A6-1	9.436	1.120	10.568
A6-2	8.606	1.120	9.639

LC-19 / LC-22			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	45.171	12.799	32.371
A1-2	44.033	15.749	28.283
A2-1	24.713	4.924	19.789
A2-2	22.734	10.649	12.085
A3-1	2.395	0.065	2.330
A3-2	16.351	3.156	13.195
A4-1	21.539	2.888	18.650
A4-2	25.651	11.884	13.767
A5-1	19.645	9.180	10.465
A5-2	18.053	11.980	6.074
A6-1	19.480	10.568	8.912
A6-2	17.833	9.639	8.194

LC-20			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	21.178	1.120	23.719
A1-2	16.186	1.120	18.128
A2-1	63.238	1.120	70.827
A2-2	56.125	1.120	62.860
A3-1	16.837	1.120	18.857
A3-2	19.456	1.120	21.791
A4-1	10.129	1.120	11.344
A4-2	17.482	1.120	19.580
A5-1	44.733	1.120	50.101
A5-2	45.156	1.120	50.575
A6-1	27.241	1.120	30.510
A6-2	29.196	1.120	32.700

LC-23			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	3.956	1.120	4.431
A1-2	4.310	1.120	4.827
A2-1	15.326	1.120	17.165
A2-2	16.114	1.120	18.048
A3-1	5.594	1.120	6.265
A3-2	6.543	1.120	7.328
A4-1	4.477	1.120	5.014
A4-2	3.182	1.120	3.564
A5-1	13.344	1.120	14.945
A5-2	13.966	1.120	15.642
A6-1	16.531	1.120	18.515
A6-2	14.600	1.120	16.352

LC-20 / LC-23			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	23.719	4.431	19.289
A1-2	18.128	4.827	13.301
A2-1	70.827	17.165	53.661
A2-2	62.860	18.048	44.812
A3-1	18.857	6.265	12.592
A3-2	21.791	7.328	14.463
A4-1	11.344	5.014	6.330
A4-2	19.580	3.564	16.016
A5-1	50.101	14.945	35.156
A5-2	50.575	15.642	34.933
A6-1	30.510	18.515	11.995
A6-2	32.700	16.352	16.348

LC-21			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	39.600	1.120	44.352
A1-2	38.993	1.120	43.672
A2-1	21.590	1.120	24.181
A2-2	23.276	1.120	26.069
A3-1	2.425	1.120	2.716
A3-2	14.409	1.120	16.138
A4-1	20.420	1.120	22.870
A4-2	17.386	1.120	19.472
A5-1	17.311	1.120	19.388
A5-2	17.755	1.120	19.886
A6-1	15.184	1.120	17.006
A6-2	15.590	1.120	17.461

LC-24			
Code	Maximum Principal Stress [Mpa]	Factor	Hot-spot Stress [Mpa]
A1-1	7.127	1.120	7.982
A1-2	5.076	1.120	5.685
A2-1	5.099	1.120	5.711
A2-2	10.039	1.120	11.244
A3-1	0.225	1.120	0.252
A3-2	2.415	1.120	2.705
A4-1	2.450	1.120	2.744
A4-2	4.435	1.120	4.967
A5-1	8.806	1.120	9.863
A5-2	10.169	1.120	11.389
A6-1	2.543	1.120	2.848
A6-2	2.274	1.120	2.547

LC-21 / LC-24			
Code	Hot-spot Stress Maximum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Minimum Tension [Mpa]	Hot-spot Stress Range [Mpa]
A1-1	44.352	7.982	36.370
A1-2	43.672	5.685	37.987
A2-1	24.181	5.711	18.470
A2-2	26.069	11.244	14.825
A3-1	2.716	0.252	2.464
A3-2	16.138	2.705	13.433
A4-1	22.870	2.744	20.126
A4-2	19.472	4.967	14.505
A5-1	19.388	9.863	9.526
A5-2	19.886	11.389	8.496
A6-1	17.006	2.848	14.158
A6-2	17.461	2.547	14.914

## BIODATA PENULIS



Moch Hamzah dilahirkan di Surabaya pada tanggal 05 Januari 1994. Pendidikan di SDN Nginden Jangkungan I Surabaya, SMP Negeri 19 Surabaya dan SMA Negeri 15 Surabaya. Setelah itu penulis melanjutkan studi sarjana di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis masuk di jurusan Teknik Kelautan melalui jalur undangan. Selama kuliah, penulis sempat aktif menjadi tim PSDM sebagai tim pengader pada periode 13/14. Penulis juga aktif dalam panitia kegiatan kampus. Penulis juga pernah melaksanakan kerja praktek di PT Terminal Peti Kemas Surabaya pada tahun 2014. Bidang yang dipilih oleh penulis adalah hidrodinamika lepas pantai sehingga Tugas Akhir yang diambil berhubungan dengan kriteria Olah Gerak Bangunan Apung.